

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Sandro Andrijević**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Bogdan, dipl. ing.

Student:

Sandro Andrijević

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno koristeći dostupnu literaturu i znanje stečeno tijekom studija.

Iskreno se zahvaljujem mentoru prof.dr.sc. Željku Bogdanu i dr.sc. Mislavu Čehilu, dipl.ing. na stručnoj pomoći i ustupljenom vremenu tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se mr. Damiru Kopjaru dipl.ing. na ukazanom vremenu i pomoći tijekom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se i svojoj obitelji, prijateljima i kolegama koji su mi pružili veliku pomoć tijekom studiranja bez kojih moje obrazovanje ne bi bilo moguće.

Sandro Andrijević



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Sandro Andrijević** Mat. br.: 0035174429

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Matematički model bloka 230 MW u TE Sisak**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Mathematical model of the 230 MW block in TE Sisak**

Opis zadatka:

Novi kombinirani kogeneracijski blok 230 MW služi za istovremenu proizvodnju toplinske i električne energije za podmirivanje potreba grada Siska. Električna snaga bloka je 230 MW te može isporučiti 70 MW toplinske energije i 30 t/h tehnološke pare. U okviru zadatka potrebno je:

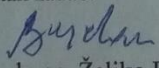
1. izraditi matematički model kogeneracijskog bloka;
2. matematički model napisati u Matlabu (ili VB Excelu);
3. optimirati pogon bloka 230 MW za karakteristične dane u zimskom, prijelaznom i ljetnom razdoblju.

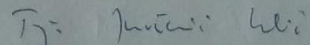
Svi potrebni dodatni ulazni podaci za proračun nalaze se kod mentora.  
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć tokom izrade.

Zadatak zadan:  
7. svibnja 2015.

Rok predaje rada:  
9. srpnja 2015.

Predviđeni datumi obrane:  
15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:  
  
Prof. dr. sc. Željko Bogdan

Predsjednica Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY .....	X
1. UVOD.....	1
1.1. TE Sisak .....	1
2. TERMODINAMIČKI OSVRT NA KRUŽNE PROCESSE.....	5
2.1. Carnotov ciklus .....	5
2.2. Braytonov ciklus .....	6
2.3. Rankineov ciklus.....	8
2.4. Kombinirani ciklus.....	9
2.5. Vezana proizvodnja toplinske i električne energije .....	11
3. MATEMATIČKI MODEL BLOKA C TE SISAK.....	13
3.1. Matematički model plinske turbine.....	14
3.1.1. Proračun izgaranja.....	18
3.2. Matematički model kotla na otpadnu toplinu (HRSG) .....	22
3.2.1. Pregrijač pare .....	25
3.2.2. Isparivač .....	26
3.2.3. Zagrijač kondenzata (ekonomajzer).....	27
3.2.4. Srednja logaritamska temperaturna razlika .....	28
3.3. Matematički model parne turbine .....	29
4. REZULTATI PRORAČUNA.....	34
4.1. Ljetno razdoblje .....	37

4.2. Zimsko razdoblje.....	40
4.3. Prijelazno razdoblje.....	43
5. ANALIZA ISPLATIVOSTI PROIZVODNJE BLOKA C U KARAKTERISTIČNOM LJETNOM, ZIMSKOM I PRIJELAZNOM RAZDOBLJU .....	46
5.1. Ljetni period.....	48
5.2. Zimski period .....	55
5.3. Prijelazno razdoblje.....	60
6. ZAKLJUČAK.....	65
LITERATURA.....	66
PRILOZI.....	67

## POPIS SLIKA

Slika 1. TE Sisak [4] .....	1
Slika 2. Carnotov ciklus prikazan u T-s dijagramu .....	5
Slika 3. Braytonov ciklus[9].....	6
Slika 4. T-s dijagram idealnog i stvarnog Braytonovog ciklusa[9].....	7
Slika 5. Shema postrojenja Rankineova ciklusa[8] .....	8
Slika 6. Rankineov ciklus u T-s dijagramu .....	9
Slika 7. Shema kombiniranog postrojenja[8] .....	10
Slika 8. T-s dijagram kombiniranog postrojenja[8] .....	10
Slika 9. Kogeneracijsko postrojenje s kondenzacijskom turbinom s reguliranim oduzimanjem .....	12
Slika 10. Shematski prikaz plinsko turbinskog procesa .....	14
Slika 11. Shematski prikaz promjene stanja zraka i dimnih plinova plinsko-turbinskog procesa u T-s dijagramu .....	15
Slika 12. Bilanca loženja.....	18
Slika 13. Primjer kotla na otpadnu toplinu HRSG[10] .....	22
Slika 14. Shema generatora pare na otpadnu toplinu TE Sisak (Blok C) .....	24
Slika 15. Shema parne turbine bloka C u TE Sisak .....	29
Slika 16. T-s dijagram parnoturbinskog procesa s pripadajućim temperaturama .....	30
Slika 17. Shema mješališta nakon visokotlačnog dijela parne turbine .....	31
Slika 18. Shema kombi postrojenja bloka C TE Sisak.....	33
Slika 19. Potrošnja goriva u ovisnosti o opterećenju i vanjskoj temperaturi .....	35
Slika 20. Dnevni raspored temperature za karakteristično razdoblje u godini.....	36
Slika 21. Protok goriva u ovisnosti o vanjskoj temperaturi karakteristično za ljetno razdoblje .....	37
Slika 22. Snaga plinske turbine za karakterističan dan ljetnog perioda .....	38
Slika 23. Snaga parne turbine za karakterističan dan ljetnog perioda.....	38
Slika 24. Iskoristivost postrojenja za karakterističan dan ljetnog perioda .....	39
Slika 25. Protok goriva u ovisnosti o vanjskoj temperaturi karakteristično za zimsko razdoblje .....	40
Slika 26. Snaga plinske turbine za karakterističan dan zimskog perioda.....	41

Slika 27. Snaga parne turbine za karakterističan dan zimskog perioda .....	41
Slika 28. Iskoristivost postrojenja za karakterističan dan zimskog perioda.....	42
Slika 29. Protok goriva u ovisnosti o vanjskoj temperaturi karakteristično za prijelazno razdoblje .....	43
Slika 30. Snaga plinske turbine za karakterističan dan prijelaznog perioda .....	44
Slika 31. Snaga parne turbine za karakterističan dan prijelaznog perioda.....	44
Slika 32. Iskoristivost postrojenja za karakterističan dan prijelaznog perioda .....	45
Slika 33. Prikaz gubitaka u ljetnom periodu kod proizvodnje električne energije kada dnevna i noćna tarifa iznose 40 €/MWh .....	49
Slika 34. Prikaz gubitaka u ljetnom periodu kod proizvodnje električne energije kada je niskotarifna cijena električne energije 50 €/MWh, a visokotarifna 75 €/MWh....	49
Slika 35. Prikaz dobiti u ljetnom periodu kod proizvodnje električne energije kada je niskotarifna cijena električne energije 60 €/MWh, a visokotarifna 100 €/MWh..	50
Slika 36. Potrebna cijena dnevne i noćne tarife kako bi blok C konstantno bio u dobitku za ljetno razdoblje .....	51
Slika 37. Prikaz gubitaka u zimskom periodu kod proizvodnje električne energije kada dnevna i noćna tarifa iznose 40 €/MWh .....	55
Slika 38. Prikaz gubitaka u zimskom periodu kod proizvodnje električne energije kada je niskotarifna cijena električne energije 50 €/MWh, a visokotarifna 75 €/MWh....	56
Slika 39. Prikaz dobiti u zimskom periodu kod proizvodnje električne energije kada je niskotarifna cijena električne energije 60 €/MWh, a visokotarifna 100 €/MWh..	56
Slika 40. Prikaz gubitaka u prijelaznom periodu kod proizvodnje električne energije kada dnevna i noćna tarifa iznose 40 €/MWh.....	60
Slika 41. Prikaz gubitaka u prijelaznom periodu kod proizvodnje električne energije kada je niskotarifna cijena električne energije 50 €/MWh, a visokotarifna 75 €/MWh....	61
Slika 42. Prikaz dobiti u prijelaznom periodu kod proizvodnje električne energije kada je niskotarifna cijena električne energije 60 €/MWh, a visokotarifna 100 €/MWh..	61



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Osnovni podaci proizvodnih postrojenja TE Sisak[1] .....	2
Tablica 2. Godišnja proizvodnja TE Sisak od 2009. do 2013. godine[1] .....	2
Tablica 3. Pretičak zraka u ovisnosti o opterećenju i temperaturi .....	20
Tablica 4. Vrijednosti korištene prilikom proračuna zarade TE Sisak .....	46
Tablica 5. Dnevni gubitak proizvodnje električne energije u ljetnom periodu kada noćna i dnevna tarifa prodaje električne energije iznosi 40 €/MWh .....	52
Tablica 6. Dnevni gubitak proizvodnje električne energije u ljetnom periodu kod noćne tarife od 50 €/MWh i dnevne tarife od 75 €/MWh .....	53
Tablica 7. Dnevni dobitak proizvodnje električne energije u ljetnom periodu kod noćne tarife od 60 €/MWh i dnevne tarife od 100 €/MWh .....	54
Tablica 8. Dnevni gubitak proizvodnje električne energije u zimskom periodu kada noćna i dnevna tarifa prodaje električne energije iznosi 40 €/MWh .....	57
Tablica 9. Dnevni gubitak proizvodnje električne energije u zimskom periodu kod noćne tarife od 50 €/MWh i dnevne tarife od 75 €/MWh.....	58
Tablica 10. Dnevni dobitak proizvodnje električne energije u zimskom periodu kod noćne tarife od 60 €/MWh i dnevne tarife od 100 €/MWh.....	59
Tablica 11. Dnevni gubitak proizvodnje električne energije u prijelaznom periodu kada noćna i dnevna tarifa prodaje električne energije iznosi 40 €/MWh .....	62
Tablica 12. Dnevni gubitak proizvodnje električne energije u prijelaznom periodu kod noćne tarife od 50 €/MWh i dnevne tarife od 75 €/MWh.....	63
Tablica 13. Dnevni dobitak proizvodnje električne energije u prijelaznom periodu kod noćne tarife od 60 €/MWh i dnevne tarife od 100 €/MWh.....	64

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\eta_c$	-	Stupanj iskoristivosti Carnotovog procesa
$W_c$	kJ	Rad Carnotovog ciklusa
$Q_1$	kJ	Dovedeni toplinski tok u Carnotovom ciklusu
$Q_2$	kJ	Odvedeni toplinski tok u Carnotovom ciklusu
$T_1$	K	Temperatura ogrjevnog spremnika
$T_2$	K	Temperatura rashladnog spremnika
$T_{1Z}$	K	Temperatura zraka na početku kompresije
$T_{2Z,iz}$	K	Izentropska temperatura zraka nakon kompresije
$p_{2Z}$	bar	Tlak zraka nakon kompresije u plinskoj turbini
$p_{1Z}$	bar	Tlak zraka prije kompresije u plinskoj turbini
$\eta_{komp}$	-	Stupanj djelovanja kompresora
$T_{2Z}$	K	Stvarna temperatura nakon kompresije
$P_{komp}$	kW	Snaga kompresora
$K_{1Z}$	-	Izentropski eksponent
$L$	kg/s	Maseni protok zraka
$h_{1Z}$	kJ/kg	Entalpija zraka na ulazu u plinsku turbinu
$h_{2Z}$	kJ/kg	Entalpija zraka na izlazu iz plinske turbine
$B$	kg/s	Maseni protok goriva
$DP$	kg/s	Maseni protok dimnih plinova
$H_d$	kJ/kg	Donja ogrjevna vrijednost goriva (plina)
$h_B$	kJ/kg	Entalpija goriva
$h_{0Z}$	kJ/kg	Entalpija zraka pri temperaturi od 0°C
$h_{3dp}$	kJ/kg	Entalpija dimnih plinova na ulazu u turbinu
$T_{4dp,iz}$	K	Izentropska temperatura dimnih plinova nakon ekspanzije
$\eta_{komp}$	-	Stupanj korisnosti plinske turbine
$T_{3dp}$	K	Temperatura dimnih plinova na ulazu u plinsku turbinu

$T_{4dp}$	K	Temperatura dimnih plinova na izlazu iz plinske turbine
$P_{PT}$	kW	Snaga plinske turbine
$h_{4dp}$	kJ/kg	Entalpija dimnih plinova na izlazu iz turbine
$P_{kor}$	kW	Korisna snaga plinske turbine
$P_{GT}$	kW	Električna snaga plinske turbine na stezaljkama generatora
$\eta_{meh}$	-	Mehanički stupanj iskoristivosti
$\eta_{red}$	-	Stupanj iskoristivosti reduktora
$\eta_{el}$	-	Stupanj iskoristivosti električnog generatora
$V_{O_{2min}}$	kmol/kg	Minimalna količina kisika potrebna za izgaranje 1 kg goriva
$M_{goriva}$	kg/kmol	Molekularna masa goriva
$V_{l\ min}$	kmol/kg	Minimalna količina zraka potrebna za izgaranje 1 kg goriva
$V_l$	kmol/kg	Stvarna količina zraka za izgaranje plinske smjese
$\lambda$	-	Faktor pretička zraka
$V_{dp}$	m <sup>3</sup> /kg	Ukupni volumen tj. količina dimnih plinova
$\rho_{dp}$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća dimnih plinova
$T_{g,u}$	K	Ulazna temperatura dimnih plinova u pojedini izmjenjivač topline u utilizatoru
$T_{g,i}$	K	Izlazna temperatura dimnih plinova iz pojedinog izmjenjivača topline u utilizatoru
$T_{w,u}$	K	Ulazna temperatura vode (pare) u pojedini izmjenjivač topline u utilizatoru
$T_{w,i}$	K	Izlazna temperatura vode (pare) iz pojedinog izmjenjivača topline u utilizatoru
$T_{p1}$	K	Temperatura na ulazu u visokotlačni stupanj parne turbine
$\Delta T_{m,log}$	K	Srednja logaritamska razlika temperatura
$p_{VT}$	bar	Tlak pare na ulazu u visokotlačni stupanj parne turbine
$T_{p7}$	°C	Temperatura niskotlačne pare prije miješanja
$p_{NT}$	bar	Tlak niskotlačne pare prije miješanja

$T_{p2}$	°C	Temperatura pare nakon ekspanzije u visokotlačnom stupnju parne turbine
$T_{p3}$	°C	Temperatura mješavine na ulazu u niskotlačni dio parne turbine
$T_{p4}$	°C	Temperatura kondenzacije
$p_{kond}$	bar	Tlak u kondenzatoru
$T_{p5}$	°C	Temperatura kondenzata nakon kondenzatora
$T_w$	°C	Temperatura vode
$\eta_{VT}$	-	Stupanj djelovanja visokotlačnog dijela parne turbine
$h_{pr}$	kJ/kg	Entalpija pregrijane pare
$h_{2i}$	kJ/kg	Entalpija pregrijane pare nakon izentropske ekspanzije u visokotlačnom stupnju parne turbine
$m_{VT}$	kg/s	Maseni protok visokotlačne pare
$m_{NT}$	kg/s	Maseni protok niskotlačne pare
$m_{mj}$	kg/s	Maseni protok mješavine koja ulazi u niskotlačni turbinski stupanj parne turbine
$h_{nt}$	kJ/kg	Entalpija niskotlačne pare
$H$	kJ/kg	Specifična entalpija
$Q_{kon}$	kW	Toplinski tok izmijenjen u kondenzatoru
$P_{VT}$	kW	Snaga visokotlačnog dijela parne turbine
$P_{NT}$	kW	Snaga niskotlačnog dijela parne turbine
$P_{ST}$	kW	Ukupna snaga parne turbine dobivena na stezaljkama generatora
$\eta_{komp}$	-	Električni stupanj iskoristivosti kombiniranog postrojenja

## SAŽETAK

Plinsko-turbinski agregat služi za proizvodnju električne energije. Ispušni plinovi iz plinske turbine ulaze u generator pare na otpadnu toplinu. Vodena para dobivena u generatoru pare koristi se za proizvodnju električne energije u parnoj turbini. U diplomskom radu proveden je matematički proračun kombiniranog postrojenja bloka C u TE Sisak. Električna snaga bloka je 230 MW, od čega je 155 MW snaga plinske turbine, a 75 MW snaga parne turbine. Matematički model bloka C napisan je u programskom paketu MATLAB. Model se sastoji od plinsko-turbinskog postrojenja s generatorom pare na otpadnu toplinu te visokotlačne i niskotlačne kondenzacijske parne turbine. Na osnovu napisanog matematičkog modela kombi ciklusa, razrađene su osnovne komponente postrojenja te su dane osnovne jednačbe koje su korištene tijekom proračuna. Također je pokazana ekonomska isplativost proizvodnje električne energije za ljetno, zimsko i prijelazno razdoblje.

Ključne riječi: kombinirano postrojenje, termoeenergetska postrojenja, kogeneracijsko postrojenje, matematički model, proračun

## SUMMARY

Electrical power is produced in gas turbine. Exhaust gases from gas turbine enter heat recovery steam generator (HRSG). The steam produced in the steam generator is used to make electrical power in the steam turbines. This paper deals with mathematical modeling of combined cycle of C-block in thermal power plant Sisak. Electrical power produced in the block is 230 MW (150 MW in the gas cycle and 75 MW in the steam cycle). Mathematical model of the C-block was made in the MATLAB software package. The model contains a gas-turbine cycle with heat recovery steam generator, high and low-pressure steam turbine. Based on the mathematical model of the described combined cycle, the main components of power plant have been made and main basic equations used for calculation are given. Also, cost-effectiveness of electricity production for summer, winter and transitional period is shown.

Key words: combined plant, thermal power plants, cogeneration plant, mathematical model, calculation

## 1. UVOD

### 1.1. TE Sisak

TE Sisak smještena je četiri kilometra nizvodno od Siska na desnoj obali Save. Koristi dva konvencionalna kondenzacijska bloka (blokovi A i B) za proizvodnju električne energije. Blokovi su izvedeni s dva visokotlačna parna kotla koji preko parne sabirnice napajaju kondenzacijsku parnu turbinu s generatorom. Svaki blok ima zasebni ispust otpadnih plinova, odnosno otpadni plinovi iz oba kotla svakog bloka ispuštaju se kroz isti betonski dimnjak. Betonski dimnjak bloka A je visine 140 metara, a bloka B 200 metara. Blok A je pušten u rad 1970., a blok B 1976. godine. Kotlovi su konstruirani za korištenje loživog ulja. Kasnijim rekonstrukcijama sustava izgaranja omogućeno je korištenje prirodnog plina. Tijekom 2001. i 2003. godine plamenici svih kotlova oba bloka zamijenjeni su tzv. LOW NO<sub>x</sub> plamenicima (starije generacije).



Slika 1. TE Sisak [4]

U pomoćnoj kotlovnici smještena su dva ista parna kotla (srednji uređaji za loženje) koji služe kao pomoćni kotlovi blokova A i B te za proizvodnju toplinske energije tj. tehnološke pare koja se koristi za grijanje stambenih, poslovnih i drugih objekata na području grada Siska. Pomoćni kotlovi PK1 i PK2 dimne plinove ispuštaju kroz čelični, samostojeći, dimnjak visine 35 m. U tablici 1. dani su osnovni podaci proizvodnih postrojenja TE Sisak, a u tablici 2. prikazana je ukupna godišnja proizvodnja toplinske energije, tehnološke pare i električne energije od 2009. do 2013. godine.

AGREGAT	TIP	GODINA IZGRADNJE
A 210 MW	kondenzacijski	1970.
B 210 MW	kondenzacijski	1976.
PK (pomoćni kotlovi) 2x20 MWt	Plamenocijevni parni kotlovi	1989.

**Tablica 1. Osnovni podaci proizvodnih postrojenja TE Sisak[1]**

GODIŠNJA PROIZVODNJA	2009.	2010.	2011.	2012.	2013.
električna energija	544,4 GWh	0 GWh	100 GWh	89 GWh	24 GWh
tehnološka para (15 bar, 300°C)	100.335 t	99.262 t	150.399 t	113.717 t	119.713 t

**Tablica 2. Godišnja proizvodnja TE Sisak od 2009. do 2013. godine[1]**



Danas blokovi A i B imaju ulogu rotirajuće ili hladne rezerve u elektroenergetskom sustavu Republike Hrvatske. Shodno tome njihov angažman se bitno razlikuje od godine do godine. Tako 2010. godine blokovi nisu radili, a tijekom 2011. godine, blok A je radio 881 sat uz prosječnu snagu od 100,5 MWe na pragu, dok je blok B radio svega 135 sati uz prosječnu snagu od 83,4 MWe na pragu. Pomoćni kotlovi u pravilu se angažiraju tijekom ogrjevnog sezone za pokrivanje ogrjevnog parnog konzuma[1].

### Opći podaci[3]:

- *položaj*: Sisak, Čret, četiri kilometra nizvodno od Siska na desnoj obali Save
- *tip*: kondenzacijska termoelektrana s dva bloka: svaki blok ima dva parna kotla (2x330 t/h, 540°C, 135 bara) i po jednu parnu turbinu s generatorom (210 MW na generatoru, 198 MW na pragu)
- *vrsta goriva*: lož ulje, prirodni plin ili kombinirano
- *ukupna snaga*: 420 MW (2x210 MW) GENERATOR  
396 MW (2x198 MW) PRAG
- *vrste proizvoda*: električna energija, tehnološka para

Termoelektrana Sisak potkraj 2015. godine u proizvodnju stavlja novi, treći blok (Blok C), pa će sa 650 MW ukupno instalirane nazivne snage predstavljati najveći i najpouzdaniji energetska kompleks Hrvatske elektroprivrede. Izgradnja novog plinskog kogeneracijskog postrojenja, poznatog kao blok C, omogućit će i ekonomičniju proizvodnju električne i toplinske energije. Treći blok, snage 230 MW električne i 50 MW toplinske energije smješten je također unutar kompleksa Termoelektrane Sisak. Namjena bloka C je proizvodnja električne i toplinske energije. Za pogon plinske turbine koristi se prirodni plin ogrjevnog vrijednosti 46 261 kJ/kg.

**Postrojenje novog bloka sastoji se od[5]:**

- plinske turbine s generatorom (plinsko-turbinski agregat)
- kotla na ispušne plinove iz plinske turbine s dimnjakom visine 65 m
- parne turbine s generatorom (parno-turbinski agregat)
- rasklopišta 220 kV s transformatorima
- plinske mjerno-redukcijske stanice (PMRS)
- postrojenja za pripremu plina u kojem su smještena i dva mala uređaja za loženje toplinske snage goriva 907 kW
- diesel agregata
- prometnica i infrastrukture

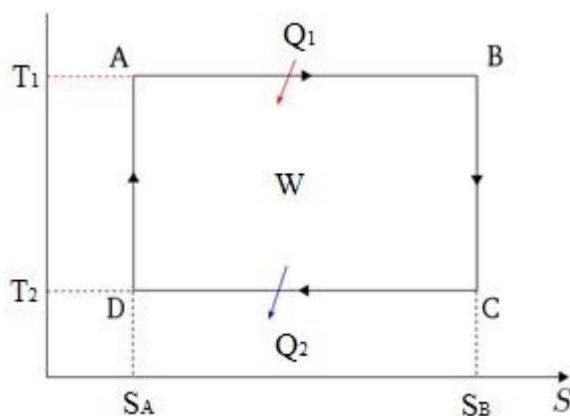
Plinsko-turbinski agregat proizvodi električnu energiju uz istovremeno korištenje otpadne topline ispušnih plinova iz plinske turbine za proizvodnju vodene pare u kotlu na ispušne plinove. Vodena para se koristi za proizvodnju električne energije u parnoj turbini, a manjim dijelom i za centralizirani toplinski sustav grada Siska.

## 2. TERMODINAMIČKI OSVRT NA KRUŽNE PROCESSE

### 2.1. Carnotov ciklus

Od posebnog značaja za termodinamiku i kružne procese je Carnotov kružni proces koji je uveden 1824. godine[6]. Ovakav kružni proces bitan je za razumijevanje rada termoenergetskih postrojenja te je od naročitog značaja za termodinamiku kao svojevrsni etalon kvalitete drugim kružnim ciklusima. Ako su promjene stanja radne tvari ravnotežne, a istovremeno i povratne (reverzibilne), tj. bez mehaničkih gubitaka i nepovratno izmijenjene topline, tada se postiže najveći mogući termički stupanj djelovanja za zadane toplinske spremnike. Termički stupanj djelovanja različitih kružnih procesa ovisi o načinu promjene stanja i kapacitetu raspoloživih toplinskih spremnika, tj. o njihovim temperaturama. Redoslijed promjene stanja kod Carnotovog ciklusa prikazan je na slici 2. Nakon izvršene kompresije radnog medija, slijedi zagrijavanje i ekspanzija, te se radni medij na kraju hladi, čime dolazi u početnu točku. Ako je temperatura dovođenja topline jednaka temperaturi ogrjevnog spremnika i ako je temperatura odvođenja topline jednaka temperaturi rashladnog spremnika, tada je riječ o idealnom Carnotovom ciklusu. Iz slike (Slika 2) slijedi formula za iskoristivost Carnotovog ciklusa:

$$\eta_c = \frac{W_c}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (2.1)$$

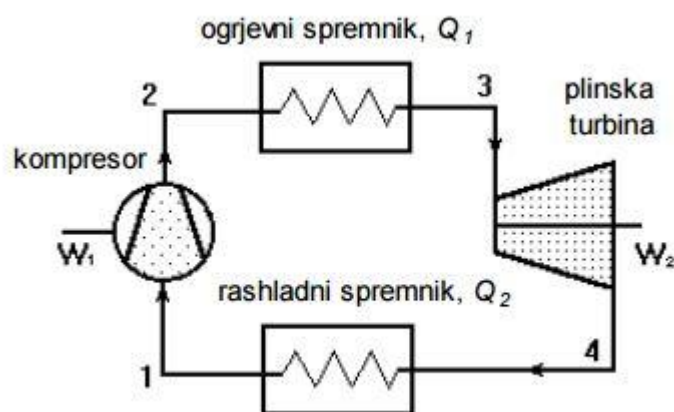


Slika 2. Carnotov ciklus prikazan u T-s dijagramu

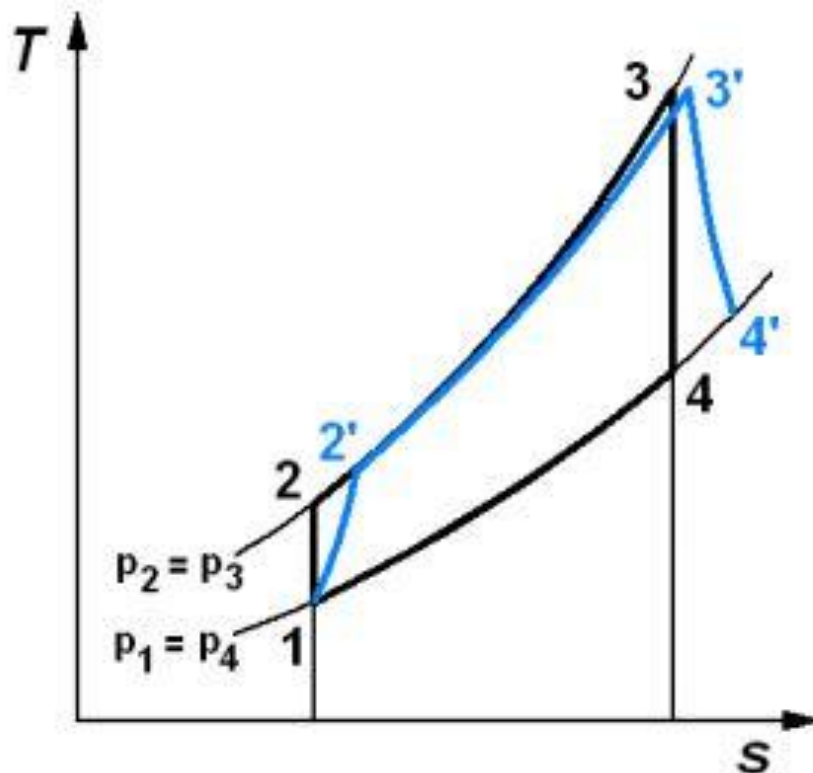
Iz jednadžbe 2.1 vidljivo je kako iskoristivost realnog Carnotovog ciklusa ovisi samo o temperaturi dovođenja i odvođenja topline neovisno o vrsti radnog medija koji sudjeluje u procesu. Termički stupanj djelovanja Carnotovog ciklusa raste s povećanjem temperature dovođenja  $T_1$ , odnosno sa smanjenjem temperature odvođenja topline  $T_2$ .

## 2.2. Braytonov ciklus

Svi plinsko-turbinski ciklusi se opisuju Braytonovim ciklusom, a odvijaju se između dvije izobare i dvije izentrope. Braytonov ciklus je zatvoreni ciklus sa zrakom kao radnom tvari čije je postrojenje shematski prikazano na slici 3. Kompresor tlači zrak kojemu se zatim izobarno dovodi toplina  $Q_1$ . Potom zagrijani zrak ekspandira u plinskoj turbini pri čemu se dobiva mehanički rad  $W_2$ . Dio tog rada troši se na rad kompresora  $W_1$ . Da bi se zrak vratio u prvobitno stanje potrebno mu je izobarno odvesti toplinu  $Q_2$ [9]. U komoru izgaranja ulazi svježi zrak visokih termodinamičkih parametara koji izaziva zapaljenje goriva koje se ubacuje u komoru izgaranja pri čemu se nastala smjesa dimnih plinova pušta direktno na turbinu. Omjer radova i termodinamička iskoristivost plinsko-turbinskog ciklusa su niski, ali mogu biti poboljšani povećanjem iskoristivosti kompresora i turbine.



Slika 3. Braytonov ciklus[9]

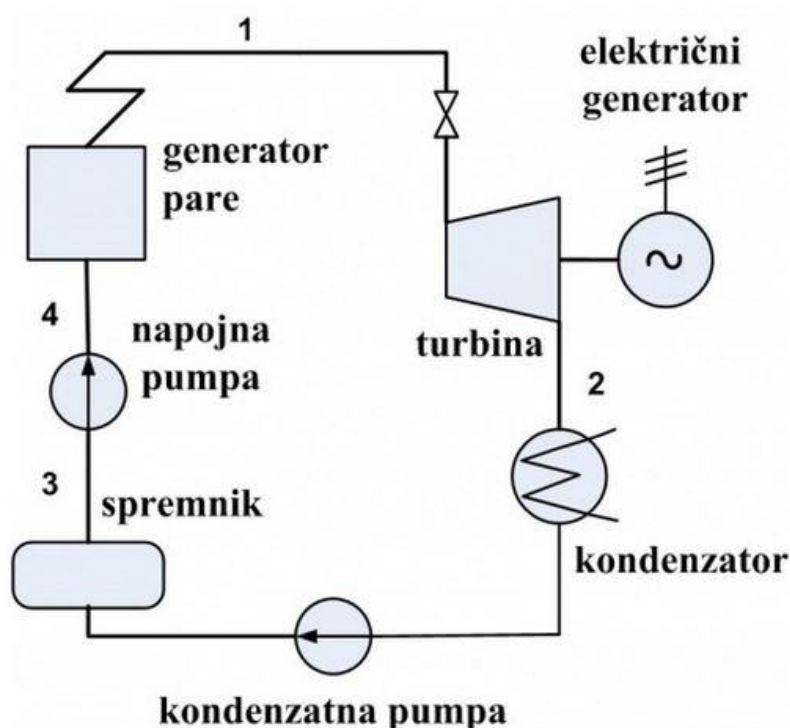


Slika 4. T-s dijagram idealnog i stvarnog Braytonovog ciklusa[9]

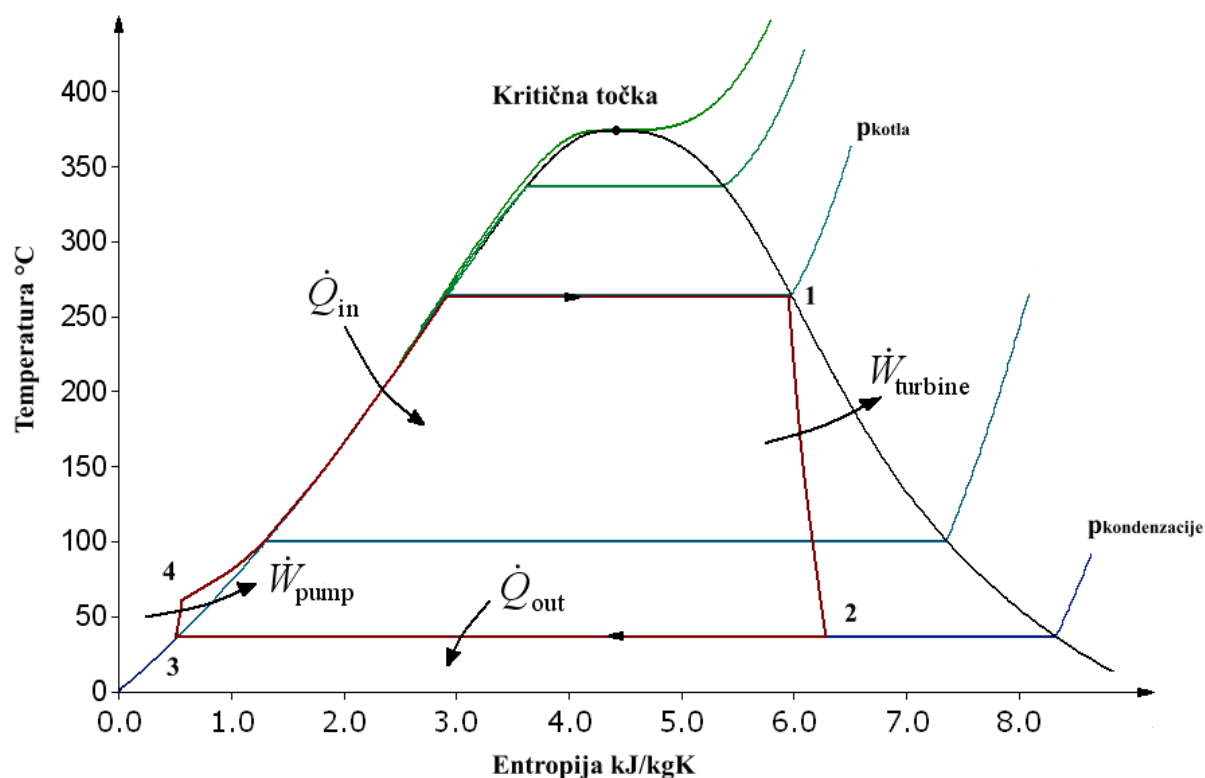
Plinska turbina radi po sličnom procesu s izuzetkom da se na ulazu u kompresor uzima vanjski zrak, a iz plinske turbine dimne plinove ili ispuštamo u atmosferu ili se ti dimni plinovi koriste kao otpadna toplina u generatorima pare na otpadnu toplinu (HRSG). Otvoreni ciklus je postao osnova rada svih postrojenja s plinskim turbinama i mlaznim motorima.

### 2.3. Rankineov ciklus

Rankineov se proces (ciklus) utoliko razlikuje od Carnotova što para u kondenzatoru potpuno kondenzira, a zatim se kondenzat pumpom ubacuje natrag u kotao. Ovakav ciklus inače je osnovni model parne elektrane (termoelektrane) i u nastavku će biti dane osnovne jednačbe računanja izmijenjenih toplinskih tokova, radova i termodinamički stupanj djelovanja procesa. Osnovni ciklus odvija se na sljedeći način: voda se u generatoru pare (parnom kotlu), pri konstantnom tlaku, podiže do visokog tlaka i temperature, uglavnom do pregrijanja, nakon čega ta para visokih parametara ekspandira u turbini do kondenzatorskog tlaka pri čemu se dobiva koristan rad. Kondenzat se pumpom šalje natrag u generator pare i time je ciklus završen te se proces odvija spočetka. Promjene stanja prikazane su na shematskom prikazu postrojenja kao i u T-s dijagramu. Prikazani proces pronalazi primjenu skoro u svim termoenergetskim postrojenjima za proizvodnju električne i toplinske energije.



Slika 5. Shema postrojenja Rankineova ciklusa[8]

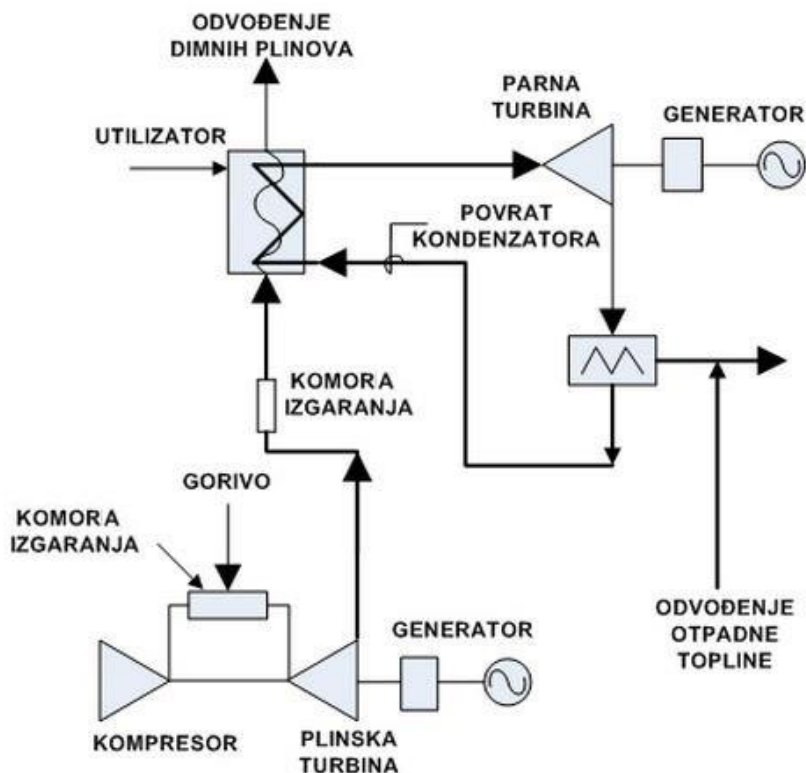


Slika 6. Rankineov ciklus u T-s dijagramu

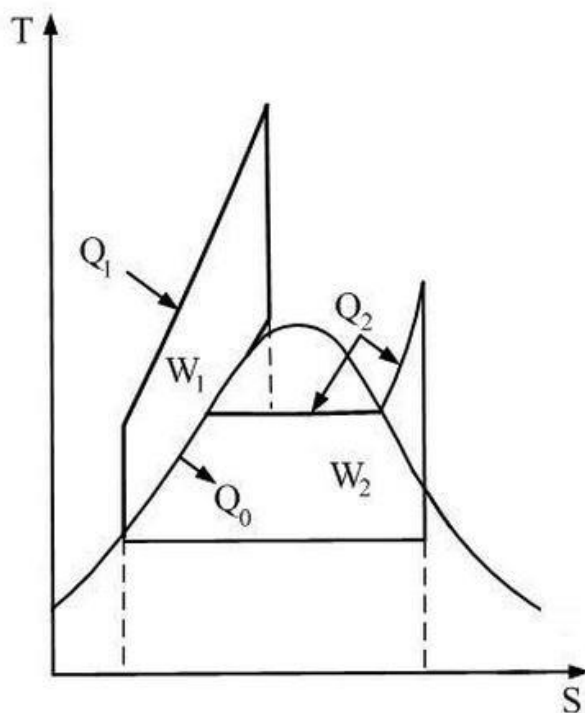
## 2.4. Kombinirani ciklus

Osnovna namjena kombiniranih postrojenja je da se iskoristi toplina nastala na izlazu iz plinske turbine. Kombinirani ciklus sastoji se od plinsko-turbinskog i parno-turbinskog dijela. Dimni plinovi na ulazu u turbinu imaju veoma visoku temperaturu od 1200 °C do 1450 °C, dok je temperatura dimnih plinova koji napuštaju turbinu još uvijek visoka (oko 600 °C). Ispuštanje takvih plinova u okoliš predstavlja znatan termodinamički gubitak. Kako bi se ti gubici izbjegli često se na plinsku turbinu nadovezuje parno-turbinsko postrojenje. Princip rada ovakvog postrojenja je da se dimni plinovi nakon izlaza iz plinske turbine uvode u kotao na otpadnu toplinu (utilizator). U utilizatoru se napojna voda zagrijava do isparavanja i pregrijava na zadane parametre. Pregrijava para odlazi iz generatora pare u parnu turbinu gdje ekspandira i predaje mehanički rad generatoru električne struje. Nakon toga para, sada već niskih parametara, odlazi u kondenzator gdje kondenzira. Nakon kondenzacije, voda se napojnom pumpom vraća u utilizator na ponovno zagrijavanje. Dok današnja parnoturbinska postrojenja dosežu vrijednosti stupnja iskoristivosti preko 45%, kombinirana postrojenja (parna-plinska turbina) ga povećavaju na više od 60%, a studije višefaznih kombiniranih procesa poput

kalij/voda/para (BRC) pokazuju stupanj iskoristivosti od preko 50 % [2]. Na slici 7 prikazano je jedno takvo postrojenje s plinskom i parnom turbinom te kompresorom.



Slika 7. Shema kombiniranog postrojenja [8]



Slika 8. T-s dijagram kombiniranog postrojenja [8]

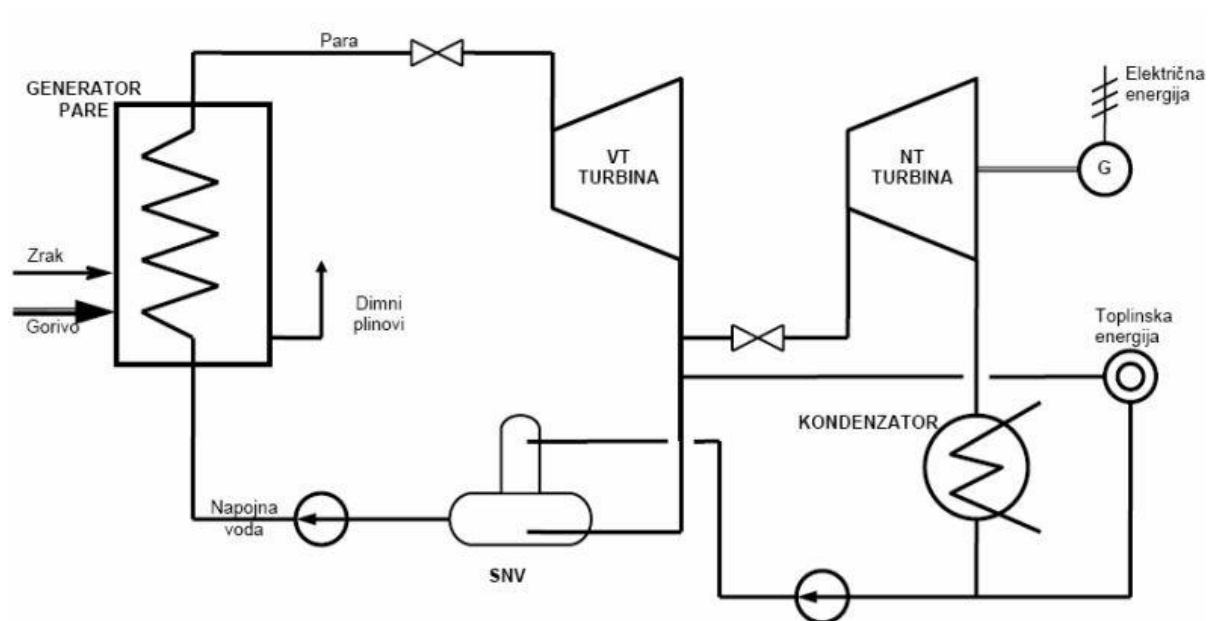


## 2.5. Vezana proizvodnja toplinske i električne energije

Kogeneracija je tehnologija istovremene proizvodnje električne i korisne toplinske energije za industrijske potrebe ili u svrhu grijanja. Potencijalna mjesta za primjenu kogeneracije nalaze se svugdje gdje postoji istovremena potreba za električnom i toplinskom energijom. Osim energana u različitim industrijama, kogeneracija je pogodna za sustave daljinskog grijanja, za hotele, bolnice, zračne luke, trgovačke centre, sportske dvorane ili bazene. Jedan od glavnih problema današnjih klasičnih termoelektrana je nemogućnost iskorištenja niskotemperaturne energije koja se u njima otpušta te se tako stvara gubitak. Međutim, upravo industrijska procesna postrojenja (uz centralizirane sustave grijanja) pružaju mogućnost vraćanja i iskorištavanja te energije u obliku topline primjenom energetske procesa s vezanom proizvodnjom električne i toplinske energije. Tako se dolazi do primjene tzv. kogeneracije kojom se učinkovitije vrednuje primarna energija, odnosno bolje iskorištava energija goriva.

Toplinska se energija koristi za tehnološke potrebe u industriji ili za zagrijavanje prostorija (centralno grijanje). U pravilu se za tu svrhu koristi para ili topla voda koja se proizvode u generatorima pare ili generatorima tople vode, izgaranjem goriva. Parametri takve pare su relativno niski jer su potrebne temperature u rasponu 70-200 °C. Međutim, izgaranjem goriva u ložištu se razvijaju temperature od 1500-1600 °C. Zbog velikih će temperaturnih razlika ( $1500 - 200 = 1300$  °C) i gubici nepovrativosti (prirast entropije) biti veliki. Zbog toga se nameće rješenje po kojemu se proizvodi para visokih parametara pogodnih za ostvarivanje parnoturbinskog kružnog procesa (temperaturna razlika je  $1500 - 500 = 1000$  °C), a odvođenje se topline iz procesa odvija na onim temperaturama koje su pogodne za traženo zagrijavanje (od 70-200 °C). Ovo vrijedi onda kada postoji istovremena potreba za toplinskom i električnom energijom, što je u pravilu slučaj. Tipovi postrojenja za vezanu proizvodnju toplinske i električne energije[2]:

- postrojenje protutlačne turbine
- postrojenje kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare
- postrojenje plinske turbine s korištenjem otpadne topline dimnih plinova
- motori s unutarnjim izgaranjem s iskorištavanjem otpadne topline



**Slika 9. Kogeneracijsko postrojenje s kondenzacijskom turbinom s reguliranim oduzimanjem**

### 3. MATEMATIČKI MODEL BLOKA C TE SISAK

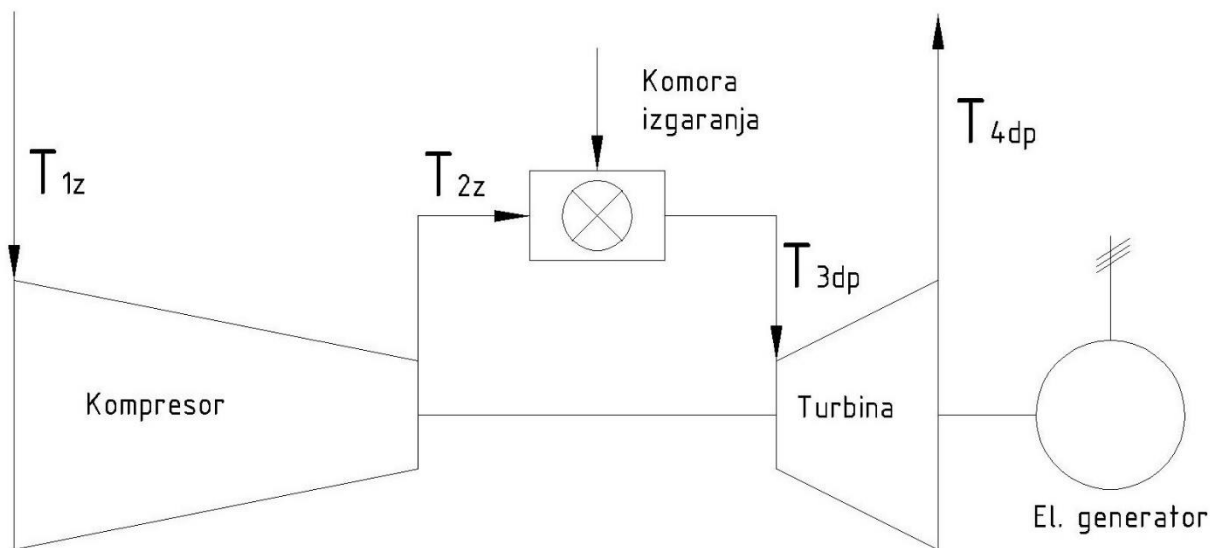
U diplomskom radu napravljen je cjelokupni matematički model bloka C u TE Sisak. Matematički model napisan je u MATLAB-u. MATLAB (matrix laboratory) je programski jezik četvrte generacije koji služi za numeričku analizu. Nastao je kroz usavršavanja paketa LINPACK i EISPACK. Program se intenzivno koristi u industrijskom razvoju kao i praktičnom inženjerstvu. Prva verzija Matlab-a napravljena je na sveučilištima Stanford University i University of New Mexico s ciljem primjene u linearnoj algebri, numeričkoj analizi i matričnoj teoriji. Na početku se temeljio na kompleksnoj matrici kao osnovnom tipu podataka. Ima mogućnost povezivanja s programima pisanim u C, C++, C#, Javi i Fortran-u. Vrlo dobro pokriva sva područja inženjerske djelatnosti kao što su obrada signala, grafičko oblikovanje, automatsko upravljanje, statistička obrada, financijska matematika, simbolička matematika i mnoga druga [11].

Blok C sastoji se od: plinske turbine, generatora pare na otpadnu toplinu HRSG-a, te parne turbine. Proces započinje kompresijom zraka iz okoline pomoću kompresora. Nakon kompresora slijedi izgaranje. Dimni plinovi nastali izgaranjem ekspandiraju u plinskoj turbini. Nazivna snaga plinske turbine na stezaljkama generatora je 155,3 MW. Nakon ekspanzije u plinskoj turbini dimni plinovi, s temperaturom iznad 500°C, uvode se u kotao na otpadnu toplinu. HRSG poznat još i pod nazivom utilizator, proizvodi visokotlačnu paru stanja 75 bara i niskotlačnu paru 6 bara. Para stanja 75 bara odvodi se iz visokotlačnog bubnja u visokotlačni dio parne turbine. Nakon ekspanzije u visokotlačnom turbinskom stupnju para se miješa s niskotlačnom parom od 6 bara te se odvodi u niskotlačni dio parne turbine. Nazivna snaga parne turbine na stezaljkama generatora iznosi 74,7 MW i kao i plinska turbina ovisi o opterećenju bloka. Nakon kondenzatora kapljevina se odvodi do otplinjača.

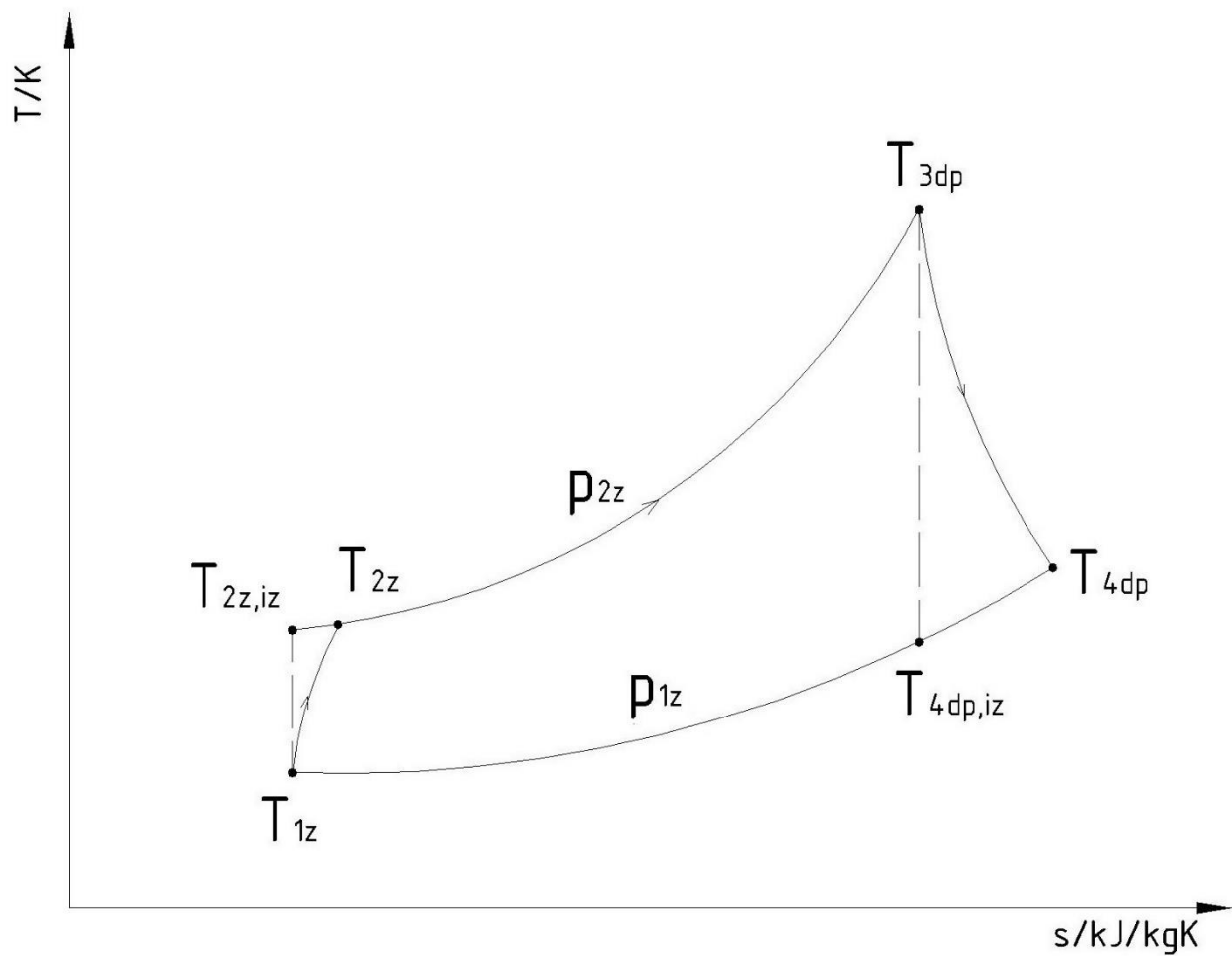
U daljnjem radu najprije će biti prikazan proračun parametara plinske turbine te komore izgaranja. Nakon toga slijedi prikaz osnovnih jednadžbi generatora pare na otpadnu toplinu te naposljetku prikaz izračuna parne turbine.

### 3.1. Matematički model plinske turbine

Matematički model plinske turbine podijeljen je na tri osnovna dijela: kompresija, izgaranje te ekspanzija (plinska turbina). Shema najjednostavnijeg postrojenja s plinskom turbinom prikazana je na slici 10, a T-s dijagram tog procesa prikazuje slika 11.



Slika 10. Shematski prikaz plinsko turbinskog procesa



**Slika 11. Shematski prikaz promjene stanja zraka i dimnih plinova plinsko-turbinskog procesa u T-s dijagramu**

Svaki karakteristični proces u plinskoj turbini počinje kompresijom. Zrak okolišne temperature  $T_{1z}$  i tlaka  $p_{1z}$  ulazi u kompresor gdje se komprimira na tlak  $p_{2z}$ . Kompresija u kompresoru teče politropski prema sljedećoj formuli:

$$T_{2z,iz} = T_{1z} \cdot \left( \frac{p_{2z}}{p_{1z}} \right)^{\left( \frac{K_{zr}-1}{K_{zr}} \right)} \quad (3.1)$$

Stupanj djelovanja kompresora izražava se prema :

$$\eta_{komp} = \frac{T_{2Z,iz} - T_{1Z}}{T_{2Z} - T_{1Z}} \quad (3.2)$$

Pomoću funkcije „interp2“ u MATLAB-u interpolirane su vrijednosti stupnja djelovanja kompresora pri određenom opterećenju plinske turbine i okolišnoj temperaturi. Stupanj djelovanja kompresora kreće se oko vrijednosti 0,85. U proračunu je on ovisan o opterećenju postrojenja. Sljedeća jednažba prikazuje izraz za stvarnu temperaturu zraka nakon kompresora.

$$T_{2Z} = T_{1Z} + \frac{T_{2Z,iz} - T_{1Z}}{\eta_{komp}} \quad (3.3)$$

Snaga potrebna za komprimiranje zraka dobije se množenjem masenog protoka zraka  $L$  i razlike entalpija prema formuli:

$$P_{komp} = L \cdot (h_{2Z} - h_{1Z}) \quad (3.4)$$

Nakon kompresije slijedi masena komora izgaranja:

$$B + L - DP = 0 \quad (3.5)$$

Komprimirani zrak ulazi u komoru izgaranja gdje s njime izgara gorivo. Specifična entalpija dimnih plinova se računa po sljedećoj jednažbi:

$$h_{3dp} = \frac{B \cdot H_d + L \cdot (h_{2Z} - h_{0Z})}{DP} + h_{dp0} \quad (3.6)$$

Osnovne jednažbe izgaranja i proračun količine dimnih plinova prikazne su u sljedećoj podcjelini.

Temperatura dimnih plinova nakon izlaska iz plinske turbine računa se po istoj formuli kao i temperatura nakon kompresije. Temperatura izentropske ekspanzije na izlazu iz turbine:

$$T_{4dp,iz} = T_{3dp} \cdot \left( \frac{p_{1z}}{p_{2z}} \right)^{\left( \frac{K_{dp}-1}{K_{dp}} \right)} \quad (3.7)$$

Prikazana temperatura nije stvarna temperatura u procesu. Da bi izračunali stvarnu temperaturu dimnih plinova koji nakon plinske turbine ulaze u utilizator poslužit ćemo se sljedećom formulom:

$$\eta_{turb} = \frac{T_{3dp} - T_{4dp}}{T_{3dp} - T_{4dp,iz}} \quad (3.8)$$

Slijedi stvarna temperatura na turbinskom izlazu:

$$T_{4dp} = T_{3dp} - \eta_{turb} \cdot (T_{3dp} - T_{4dp,iz}) \quad (3.9)$$

Ukupna snaga dobivena ekspanzijom dimnih plinova u plinskoj turbini je:

$$P_{PT} = DP \cdot (h_{3dp} - h_{4dp}) \quad (3.10)$$

Korisnu snagu dobivamo tako da od ukupne snage plinske turbine oduzmemo snagu za pogon kompresora :

$$P_{kor} = P_{PT} - P_{komp} \quad (3.11)$$

Električna snaga dobivena na stezaljkama generatora dobivena je umanjivanjem korisne snage sa svim gubicima prema formuli :

$$P_{GT} = \eta_{meh} \cdot \eta_{red} \cdot \eta_{el} \cdot P_{kor} \quad (3.12)$$

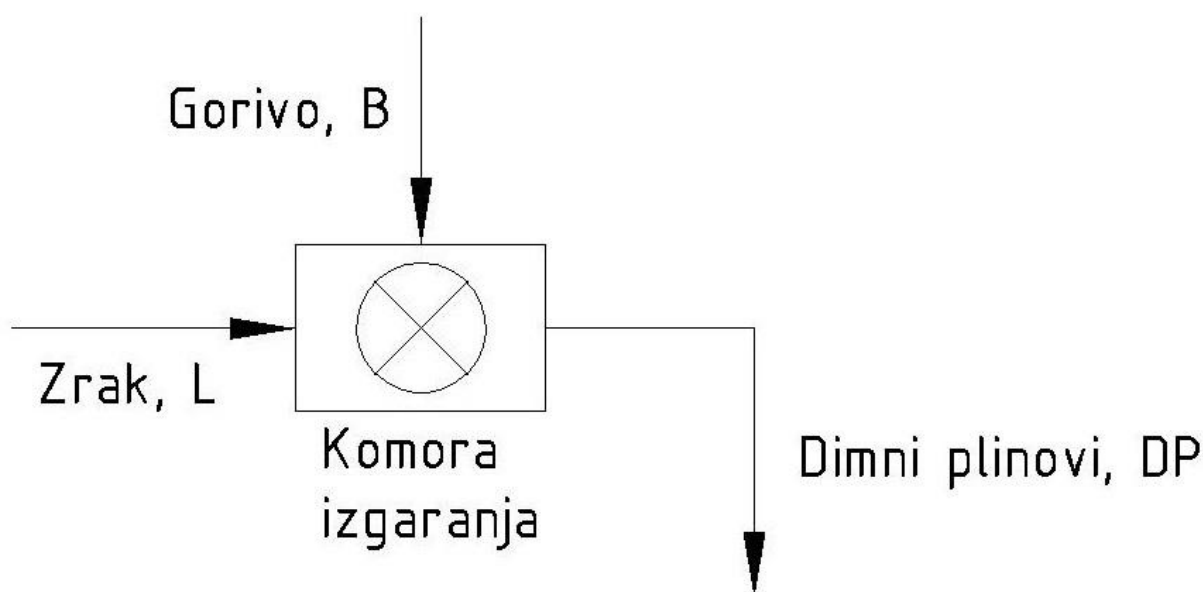
### 3.1.1. Proračun izgaranja

Gorivo bloka C isključivo je prirodni plin. Prema podacima dobivenim u TE Sisak ogrjevnost plinskog goriva je  $H_d = 46261 \text{ KJ/kg}$ . Sastav plinskog goriva koji je korišten prilikom proračuna je:

$\text{CH}_4$	92,14%
$\text{C}_2\text{H}_6$	5,60%
$\text{C}_3\text{H}_8$	0,24%
$\text{C}_4\text{H}_{10}$	0,01%
$\text{N}_2$	2,01%

Proračun izgaranja u plinskoj turbini temeljn je na dva opća zakona:

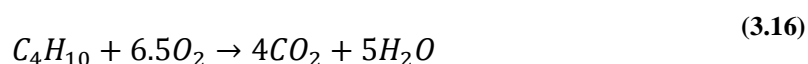
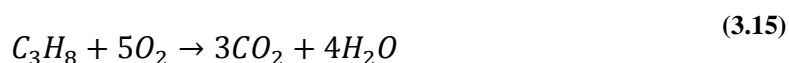
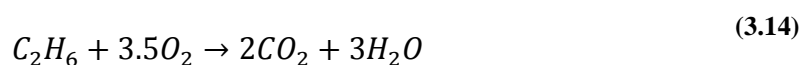
- zakon održanja mase
- zakon održanja energije



Slika 12. Bilanca loženja

Model izgaranja vrši se pomoću stehiometrijskih jednadžbi.





Prikazane karakteristične stehiometrijske jednačbe izgaranja pojedinih sudionika pomažu nam u daljnjem izračunu količine kisika tj. zraka za izgaranje. Da bismo izračunali potrebni volumen zraka za izgaranje prvo je potrebno izračunati potrebni teoretski volumen kisika. Teoretski volumen kisika je ujedno i minimalni, jer manje dovodenje kisika od minimalnog znači nepotpuno izgaranje i nepotrebne gubitke što se nastoji izbjeći.

$$V_{O_{2min}} = (2CH_4 + 3,5C_2H_4 + 5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6,5C_4H_{10}) \cdot \frac{22.4}{M_{goriva}} \quad (3.17)$$

Molarna masa goriva računa se prema:

$$M_{goriva} = M_{CH_4} \cdot CH_4 + M_{C_2H_6} \cdot C_2H_6 + M_{C_3H_8} \cdot C_3H_8 + M_{C_4H_{10}} \cdot C_4H_{10} + M_{N_2} \cdot N_2 \quad (3.18)$$

Budući da je volumna (množinska) koncentracija kisika u zraku 21%, minimalni volumen zraka za izgaranje goriva računamo po sljedećoj formuli:

$$V_{lmin} = \frac{V_{O_{2min}}}{0.21} \quad (3.19)$$

Kako u stvarnosti nije realno očekivati da svaka čestica goriva dođe u kontakt s odgovarajućom česticom kisika stvarna količina zraka potrebna za izgaranje goriva uzima u obzir i pretičak zraka.

$$V_l = \lambda \cdot V_{l\min} \quad (3.20)$$

U ovom modelu pretičak zraka ovisan je o opterećenju i temperaturi prema tablici 3. Svi navedeni podaci za pretičak zraka dobiveni su u postrojenju termoelektrane Sisak.

	-25 °C	+5 °C	+10,7 °C	+15 °C	-25 °C
<b>100 % opterećenje</b>	2,81	2,91	2,93	2,95	2,96
<b>70 % opterećenje</b>	2,85	3	3,05	3,09	3,11

**Tablica 3. Pretičak zraka u ovisnosti o opterećenju i temperaturi**

Prije određivanja ukupne količine nastale izgaranjem najprije je potrebno izračunati sastav dimnih plinova.

$$V_{CO_2} = (CH_4 + 2C_2H_4 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10}) \cdot \frac{22.4}{M_{goriva}} \quad (3.21)$$

$$V_{N_2\min} = N_2 \cdot \frac{22.4}{M_{goriva}} + 0.79 \cdot V_{l\min} \quad (3.22)$$

$$V_{H_2O} = (H_2 + 2CH_4 + 3C_2H_4 + 4C_3H_8 + 5C_4H_{10}) \cdot \frac{22.4}{M_{goriva}} \quad (3.23)$$

Ukupni volumen tj. količina dimnih plinova

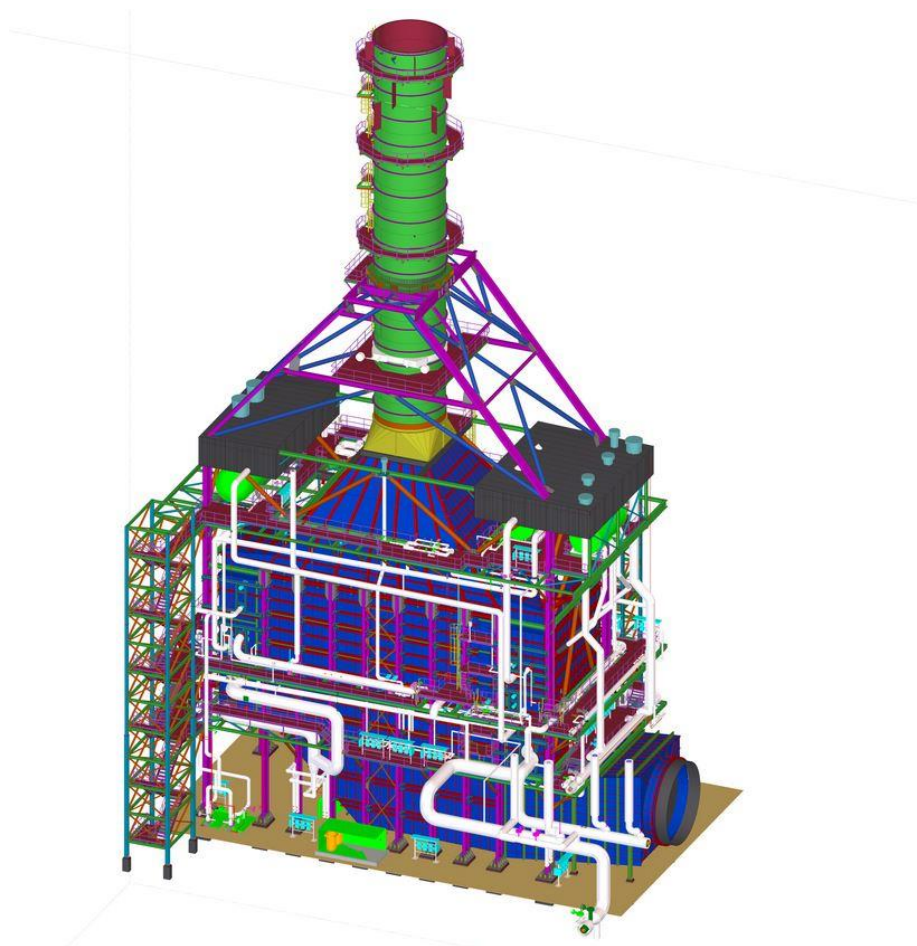
$$V_{dp} = V_{CO_2} + V_{N_2\min} + V_{H_2O} + (\lambda - 1) \cdot V_{l\min} \quad (3.24)$$

Gustoća dimnih plinova računa se prema izrazu:

$$\rho_{dp} = \frac{44 \cdot V_{CO_2} + 28 \cdot V_{N_2 \min} + 18 \cdot V_{H_2O} + 29 \cdot (\lambda - 1) \cdot V_{l \min}}{22.4 \cdot V_{dp}} \quad (3.25)$$

### 3.2. Matematički model kotla na otpadnu toplinu (HRSG)

Termoenergetski blok C u sebi sadrži jedan parni kotao na otpadnu toplinu HRSG. Primjer takvog kotla je prikazan na slici (Slika 13). HRSG (eng. Heat Recovery Steam Generation) kotao na otpadnu toplinu koristi se u termoenergetskim postrojenjima kako bi se iskoristila preostala energija iz dimnih plinova najčešće nakon procesa u plinskoj turbini. Dimni plinovi nakon plinske turbine imaju temperaturu višu od 500 °C te se s takvim stanjem uvode u utilizator. Kotao na otpadnu toplinu iskorištava toplinski tok dimnih plinova visoke temperature kako bi proizveo vodenu paru. Također, u industrijskim procesima zbog utjecaja porasta cijene energije u porastu je i korištenje otpadne topline putem kotlova. HRSG kotao na otpadnu toplinu pruža znatan doprinos učinkovitom iskorištenju primarnih izvora energije.



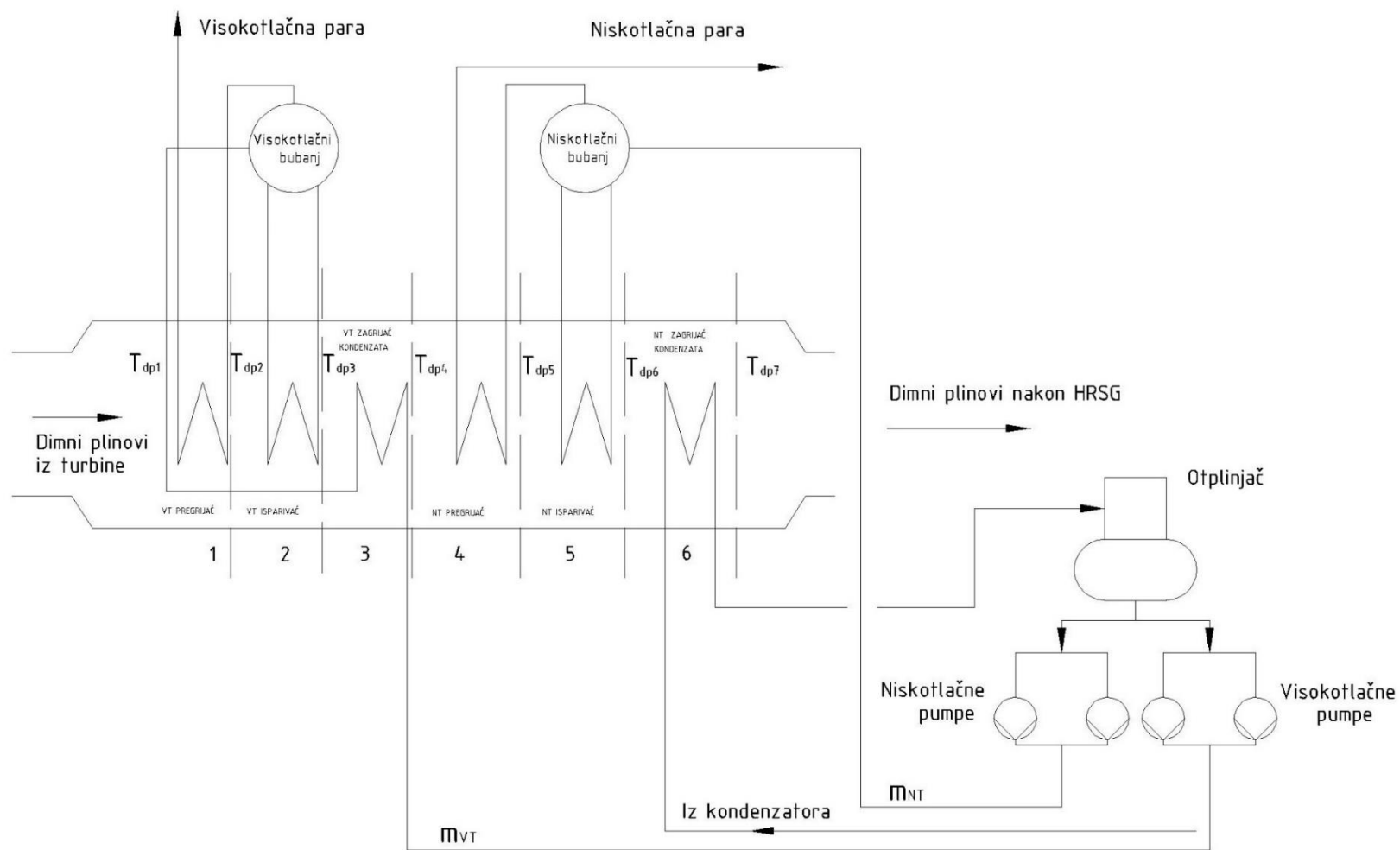
Slika 13. Primjer kotla na otpadnu toplinu HRSG[10]

HRSB bloka C u Sisku podijeljen je na 6 segmenata, odnosno 6 područja izmjene topline. Shema generatora pare prikazana je na slici (Slika 14). U bloku C postoje dva bubnja, i to na strani niskog tlaka i visokog tlaka. U modelu je izveden proračun svih 6 izmjenjivača topline te su dobivene temperature po segmentima. Izlazna temperatura dimnih plinova jednog izmjenjivača topline ujedno je ulazna temperatura drugog izmjenjivača.

Tijekom proračuna u programskom jeziku MATLAB, u programu "Refprop" napravljena je smjesa dimnih plinova  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  i  $\text{N}_2$  te su pomoću njega izračunate vrijednosti entalpije i entropije smjese dimnih plinova. Treba napomenuti kako je tijekom proračuna zadnja vrijednost temperature dimnih plinova na izlazu iz generatora pare ograničena na  $105^\circ\text{C}$  kako bi se izbjegla kondenzacija vodene pare.

Dimni plinovi, čija je količina i temperatura ovisna o opterećenju plinske turbine (od 70% do 100%) i temperaturi okoliša (od  $-25^\circ\text{C}$  do  $38^\circ\text{C}$ ), ulaze u generator pare s temperaturom većom od  $500^\circ\text{C}$ . Kako pokazuje slika 14 dimni plinovi prvo prenose toplinski tok cijevnom snopu prvog pregrijača visokotlačne pare i visokotlačnom isparivaču. Potom plinovi, s nešto nižom temperaturom, nailaze na prvi zagrijač kondenzata, a nakon zagrijača predaju toplinski tok niskotlačnom pregrijaču pare te niskotlačnom isparivaču. Prije ispuštanja u atmosferu, toplinski tok se prenosi na drugi zagrijač kondenzata.

Proces generiranja pare počinje zagrijavanjem kondenzata u zagrijaču prikazanom na toplinskoj shemi. Zagrijana voda potom ulazi u otplinjač nakon kojeg se dio vode niskotlačnom pumpom diže na nešto veći tlak od tlaka zasićenja i odvodi u niskotlačni bubanj dok se dio vode tlači visokotlačnim pumpama i šalje u drugi zagrijač. Iz niskotlačnog bubnja voda prvo isparava te se pregrijava i šalje u niskotlačni dio parne turbine. Isti proces događa se i u visokotlačnom bubnju. Para se nakon pregrijanja šalje u visokotlačni dio parne turbine.



Slika 14. Shema generatora pare na otpadnu toplotu TE Sisak (Blok C)

### 3.2.1. Pregrijač pare

#### VT Pregrijač :

$$Q_{VTpr} = DP \cdot (H_{DP1} - H_{DP2}) \quad (3.26)$$

$$Q_{VTpr} = m_{VT} \cdot (H_{W1} - H_{W2}) \quad (3.27)$$

$$Q_{VTpr} = k_{VTpr} \cdot A_{VTpr} \cdot \Delta T_{VTpr} \quad (3.28)$$

#### NT Pregrijač:

$$Q_{NTpr} = DP \cdot (H_{DP4} - H_{DP5}) \quad (3.29)$$

$$Q_{NTpr} = m_{NT} \cdot (H_{W7} - H_{W8}) \quad (3.30)$$

$$Q_{NTpr} = k_{NTpr} \cdot A_{NTpr} \cdot \Delta T_{NTpr} \quad (3.31)$$

$Q_{VTpr}; Q_{NTpr}$	<i>ukupno izmijenjeni toplinski tok visokotlačnog i niskotlačnog pregrijača</i>	MW
$m_{VT}; m_{NT}$	<i>maseni protok pare kroz pregrijač</i>	kg/s
$DP$	<i>maseni protok dimnih plinova</i>	kg/s
$H_{DP}$	<i>specifična entalpija dimnih plinova</i>	kJ/kg
$H_W$	<i>specifična entalpija pregrijane pare</i>	kJ/kg
$k_{NTpr}; k_{VTpr}$	<i>koeficijent prolaza topline pregrijača</i>	W/m <sup>2</sup> K
$A_{VTpr}; A_{NTpr}$	<i>površina pregrijača</i>	m <sup>2</sup>
$\Delta T_{VTpr}; \Delta T_{NTpr}$	<i>srednja logaritamska razlika temperatura pare i dimnih plinova u pregrijaču</i>	K

### 3.2.2. Isparivač

#### VT Isparivač:

$$Q_{VTisp} = DP \cdot (H_{DP2} - H_{DP3}) \quad (3.32)$$

$$Q_{VTisp} = m_{VT} \cdot (H_{W3} - H_{W4}) \quad (3.33)$$

$$Q_{VTisp} = k_{VTisp} \cdot A_{VTisp} \cdot \Delta T_{VTisp} \quad (3.34)$$

#### NT Isparivač:

$$Q_{NTisp} = DP \cdot (H_{DP5} - H_{DP6}) \quad (3.35)$$

$$Q_{NTisp} = m_{NT} \cdot (H_{W9} - H_{W10}) \quad (3.36)$$

$$Q_{NTisp} = k_{NTisp} \cdot A_{NTisp} \cdot \Delta T_{NTisp} \quad (3.37)$$

$Q_{VTisp}; Q_{NTisp}$	<i>ukupno izmijenjeni toplinski tok visokotlačnog i niskotlačnog isparivača</i>	MW
$m_{VT}; m_{NT}$	<i>maseni protok pare kroz isparivač</i>	kg/s
$DP$	<i>maseni protok dimnih plinova</i>	kg/s
$H_{DP}$	<i>specifična entalpija dimnih plinova</i>	kJ/kg
$H_W$	<i>specifična entalpija zasićene pare</i>	kJ/kg
$k_{NTisp}; k_{VTisp}$	<i>koeficijent prolaza topline isparivača</i>	W/m <sup>2</sup> K
$A_{VTisp}; A_{NTisp}$	<i>površina isparivača</i>	m <sup>2</sup>
$\Delta T_{VTisp}; \Delta T_{NTisp}$	<i>srednja logaritamska razlika temperatura pare i dimnih plinova u isparivaču</i>	K



### 3.2.3. Zagrijač kondenzata (ekonomajzer)

#### VT Ekonomajzer

$$Q_{VTeko} = DP \cdot (H_{DP3} - H_{DP4}) \quad (3.38)$$

$$Q_{VTeko} = m_{VT} \cdot (H_{W5} - H_{W6}) \quad (3.39)$$

$$Q_{VTeko} = k_{VTeko} \cdot A_{VTeko} \cdot \Delta T_{VTeko} \quad (3.40)$$

#### NT Ekonomajzer

$$Q_{NTeko} = DP \cdot (H_{DP6} - H_{DP7}) \quad (3.41)$$

$$Q_{NTeko} = (m_{NT} + m_{VT}) \cdot (H_{W11} - H_{W12}) \quad (3.42)$$

$$Q_{NTeko} = k_{NTeko} \cdot A_{NTeko} \cdot \Delta T_{NTeko} \quad (3.43)$$

$Q_{VTeko}; Q_{NTeko}$	<i>ukupno izmijenjeni toplinski tok visokotlačnog i niskotlačnog ekonomajzera</i>	MW
$m_{VT}; m_{NT}$	<i>maseni protok pare kroz ekonomajzer</i>	kg/s
$DP$	<i>maseni protok dimnih plinova</i>	kg/s
$H_{DP}$	<i>specifična entalpija dimnih plinova</i>	kJ/kg
$H_W$	<i>specifična entalpija kondenzata</i>	kJ/kg
$k_{NTeko}; k_{VTeko}$	<i>koeficijent prolaza topline ekonomajzera</i>	W/m <sup>2</sup> K
$A_{VTeko}; A_{NTeko}$	<i>površina ekonomajzera</i>	m <sup>2</sup>
$\Delta T_{VTeko}; \Delta T_{NTeko}$	<i>srednja logaritamska razlika temperatura pare i dimnih plinova u ekonomajzeru</i>	K

### 3.2.4. Srednja logaritamska temperaturna razlika

Srednja logaritamska temperaturna razlika za pojedini izmjenjivač računa se prema:

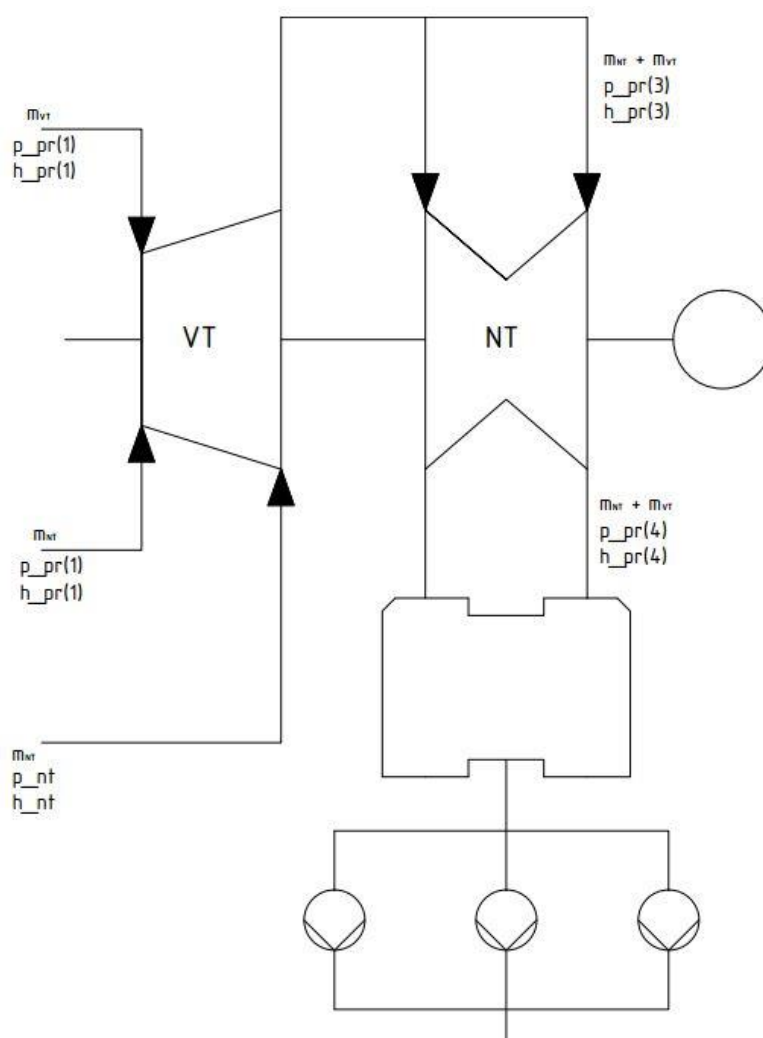
$$\Delta t_1 = T_{dp,u} - T_{w,i} \quad (3.44)$$

$$\Delta t_2 = T_{dp,i} - T_{w,u} \quad (3.45)$$

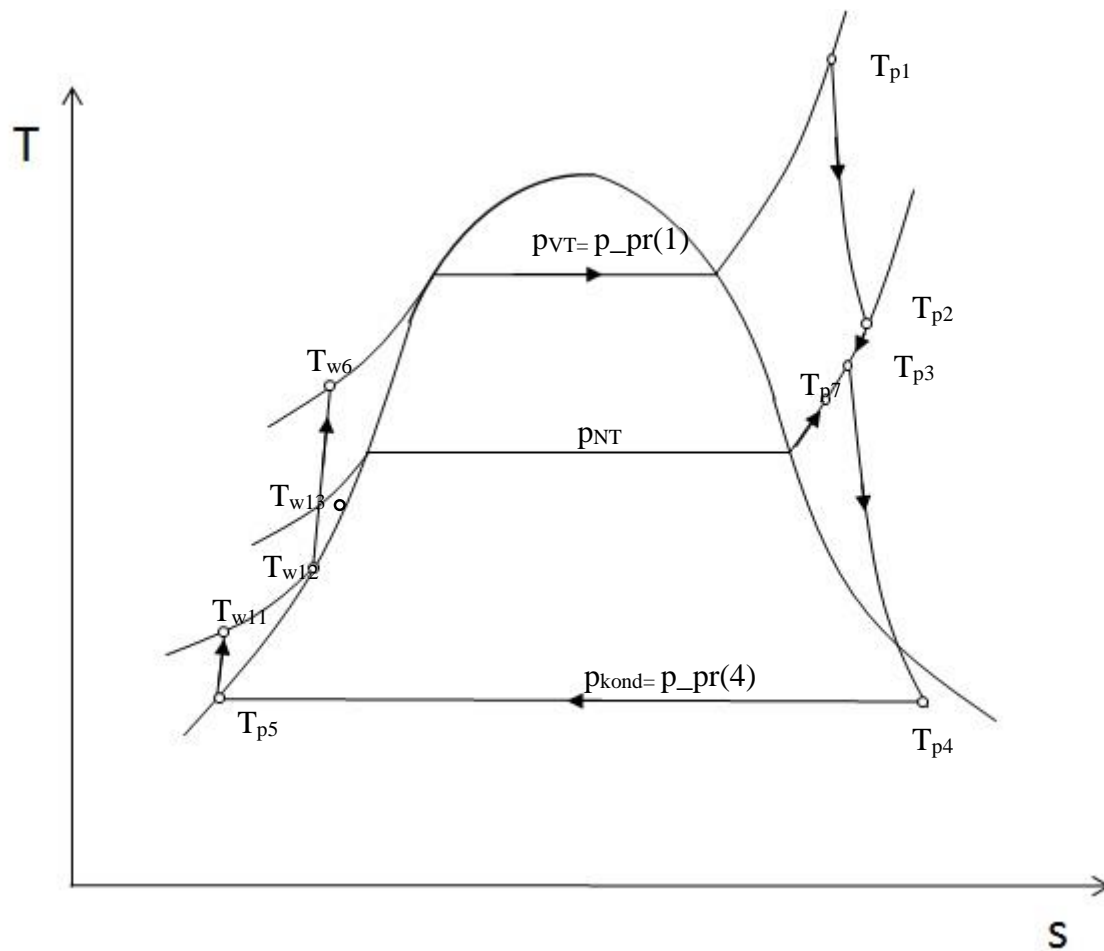
$$\Delta T_{m,log} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (3.26)$$

### 3.3. Matematički model parne turbine

Parna turbina bloka C u TE Sisak shematski je prikazana na sljedećoj slici. Na slici su prikazani maseni tokovi pojedinog stupnja, tlakovi i entalpije za pojedino stanje pare. Turbina je podijeljena na visokotlačni i niskotlačni dio. Na ulazu u visokotlačni stupanj turbine temperatura pregrijane pare je  $T_{p1} = 512,8^{\circ}\text{C}$ , a tlak pare je  $p_{VT} = 75,58 \text{ bar}$ . Nakon prolaska kroz prvi stupanj turbine para se miješa s niskotlačnom parom temperature  $T_{p7} = 206,1^{\circ}\text{C}$  i tlakom  $p_{NT} = 6,42 \text{ bar}$  te nakon miješanja ekspanzira u niskotlačnom stupnju turbine.



Slika 15. Shema parne turbine bloka C u TE Sisak



Slika 16. T-s dijagram parnoturbinskog procesa s pripadajućim temperaturama

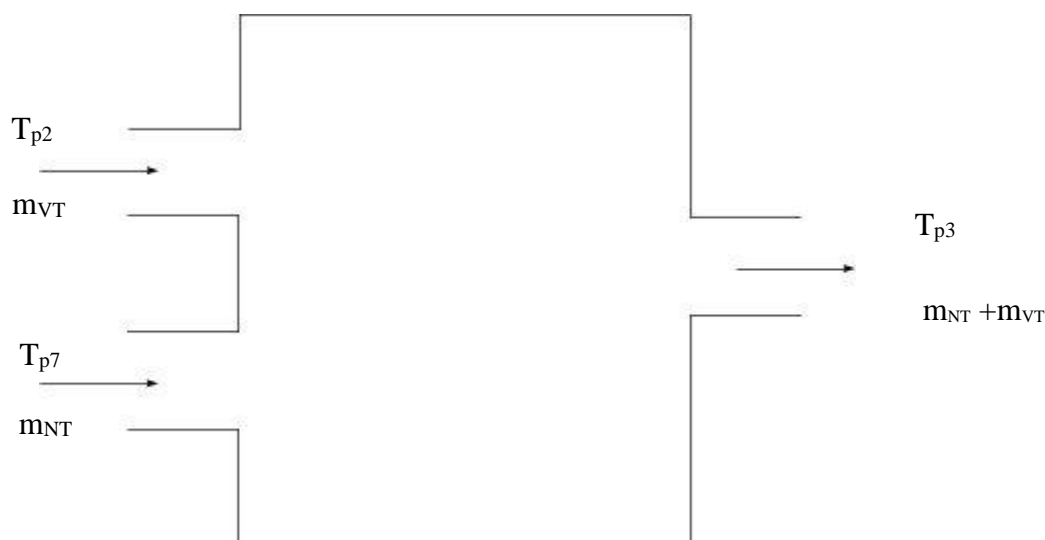
Pomoću XSteam određena je entalpija i entropija pregrijane pare. XSteam je funkcija korištena u MATLAB-u za računanje toplinskih stanja vode. Daljnjim proračunom određujemo stvarnu entalpiju stanja 2 (nakon prvog stupnja) iz formule za stupanj djelovanja parne turbine:

$$\eta_{VT} = \frac{h_{pr}(1) - h_{pr}(2)}{h_{pr}(1) - h_{2i}} \quad (3.47)$$

$$h_{pr}(2) = h_{pr}(1) - \eta_{VT}(h_{pr}(1) - h_{2i}) \quad (3.48)$$

Kako iskoristivost visokotlačnog dijela parne turbine nije poznata uzeta je vrijednost  $\eta_{VT} = 0,86$ .

Para se nakon izlaska iz prvog stupnja turbine miješa s parom iz niskotlačnog bubnja te takva mješavina ekspandira u niskotlačnom stupnju. Shematski prikaz mješališta prikazuje slika 17.



**Slika 17. Shema mješališta nakon visokotlačnog dijela parne turbine**

Kod slučaja kojeg razmatramo, maseni protok mješavine jednak je zbroju ulaznih masenih protoka. Masena bilanca mješališta je:

$$m_{mj} = m_{VT} + m_{NT} \quad (3.49)$$

Pretpostavljamo da je mješalište izolirano, toplinski tok je  $\Phi_{I,II} = 0 \text{ W}$ , a pri tom je također i tehnički rad jednak nuli. Tako prvi glavni stavak poprima ovaj oblik:

$$H_{II} - H_I = 0 \quad (3.50)$$

$$H_{II} = H_I \quad (3.51)$$

$$m_{mj} \cdot h_{pr}(3) = m_{VT} \cdot h_{pr}(2) + m_{NT} \cdot h_{nt} \quad (3.52)$$

Sređivanjem ovog izraza dobije se entalpija mješavine koja ekspandira u niskotlačnom dijelu turbine :

$$h_{pr}(3) = \frac{m_{VT} \cdot h_{pr}(2) + m_{NT} \cdot h_{nt}}{m_{mj}} \quad (3.53)$$

Proračun kondenzatora u kojem se na temelju određenog protoka  $m_{mj}$  i razlike entalpija izlaznog kondenzata i entalpije kapljevite vode određuje toplinski tok nepovratno izgubljen u kondenzatoru.

$$Q_{kon} = m_{mj} \cdot (h_{pr}(4) - (h_{pr}(5))) \quad (3.54)$$

Uz razliku entalpija i pripadajući protoka za određeni dio turbine dobije se snaga pojedinog stupnja turbine. Snaga visokotlačnog dijela turbine:

$$P_{VT} = m_{VT} \cdot (h_{pr}(1) - h_{pr}(2)) \cdot \eta_{meh} \quad (3.55)$$

Snaga niskotlačnog dijela turbine:

$$P_{NT} = m_{mj} \cdot (h_{pr}(3) - h_{pr}(4)) \cdot \eta_{meh} \quad (3.56)$$

Ukupna snaga dobivena na stezaljkama generatora je:

$$P_{st} = (P_{NT} + P_{VT}) \cdot \eta_{el} \quad (3.57)$$

Električni stupanj iskoristivosti cijelog kombiniranog postrojenja :

$$\eta_{postr} = \frac{P_{GT} + P_{ST}}{B \cdot H_d} \quad (3.58)$$



## 4. REZULTATI PRORAČUNA

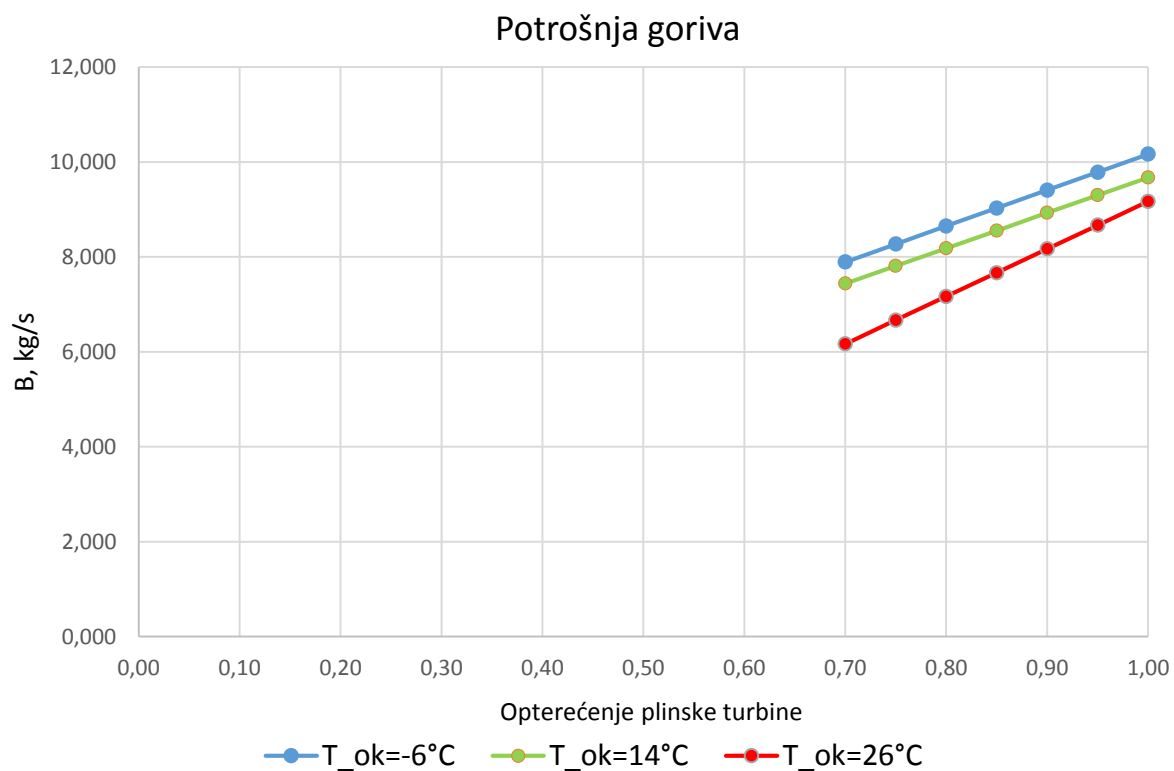
Tijekom proračuna matematičkog modela u MATLAB-u, korištene su brojne pretpostavke kako bi se olakšao matematički model zbog svoje kompleksnosti i složenosti.

Neke od pretpostavki koje su korištene tijekom proračuna su:

- nema pada tlaka u cjevovodu
- nema pada tlaka u turbinama
- izentropski eksponent zraka i dimnih plinova je konstantan
- tlak kondenzacije je konstantan
- iskoristivost parne turbine je konstantna

Treba napomenuti kako su, zbog nedostatka informacija za blok C, neke vrijednosti kao što su tlak kondenzacije, mehanička iskoristivost, iskoristivost kompresora i iskoristivost turbinskog stupnja plinske turbine za potrebe ovog proračuna uzete iz sličnog kombi bloka (TE-TO Zagreb) kako bi se dobio što realniji model. Blok C, TE Siska radi pri opterećenju od 70-100%. Sljedeća slika pokazuje potrošnju plinskog goriva u ovisnosti o opterećenju i vanjskoj temperaturi. Kroz daljnji rad prikazani su rezultati kod tri opterećenja (100%, 85% i 70%) kombi procesa u ovisnosti o vanjskoj temperaturi. Slika 20 pokazuje dnevnu promjenu temperature za ljetno, zimsko i prijelazno razdoblje. Promjenjivost dnevne temperature za svako razdoblje ima izravan utjecaj na snagu plinske i parne turbine, ulaznu temperaturu u generator pare i iskoristivost postrojenja. U daljnjoj analizi prikazani su neki rezultati kod konstantnog opterećenja i promjenjive okolišne temperature za karakteristično doba godine.

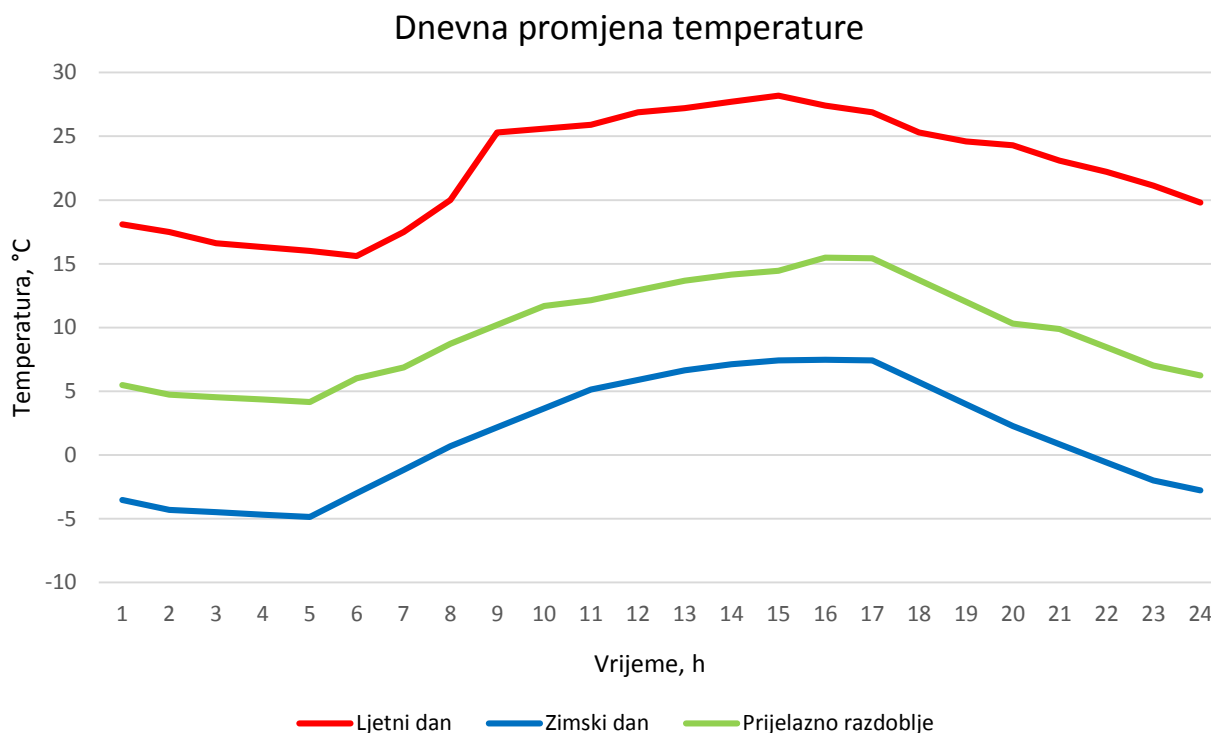




**Slika 19. Potrošnja goriva u ovisnosti o opterećenju i vanjskoj temperaturi**

Iz slike 19 može se primijetiti porast protoka goriva kod povećanja opterećenja te povećanje protoka kod sniženja vanjske temperature.

Kako bi se što realnije simulirao rad bloka C, uzeta su tri karakteristična dana za zimsko, prijelazno i ljetno razdoblje. Prikazani podaci iz slike 19 označavaju dnevni raspored temperature za tri razdoblja u godini.

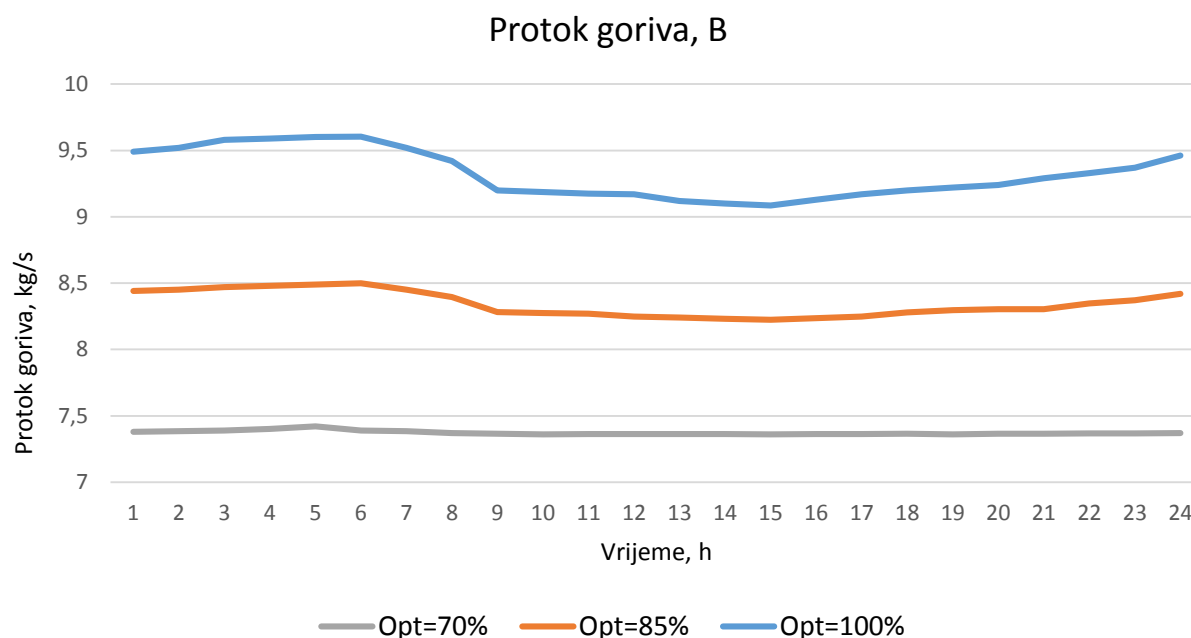


**Slika 20. Dnevni raspored temperature za karakteristično razdoblje u godini**

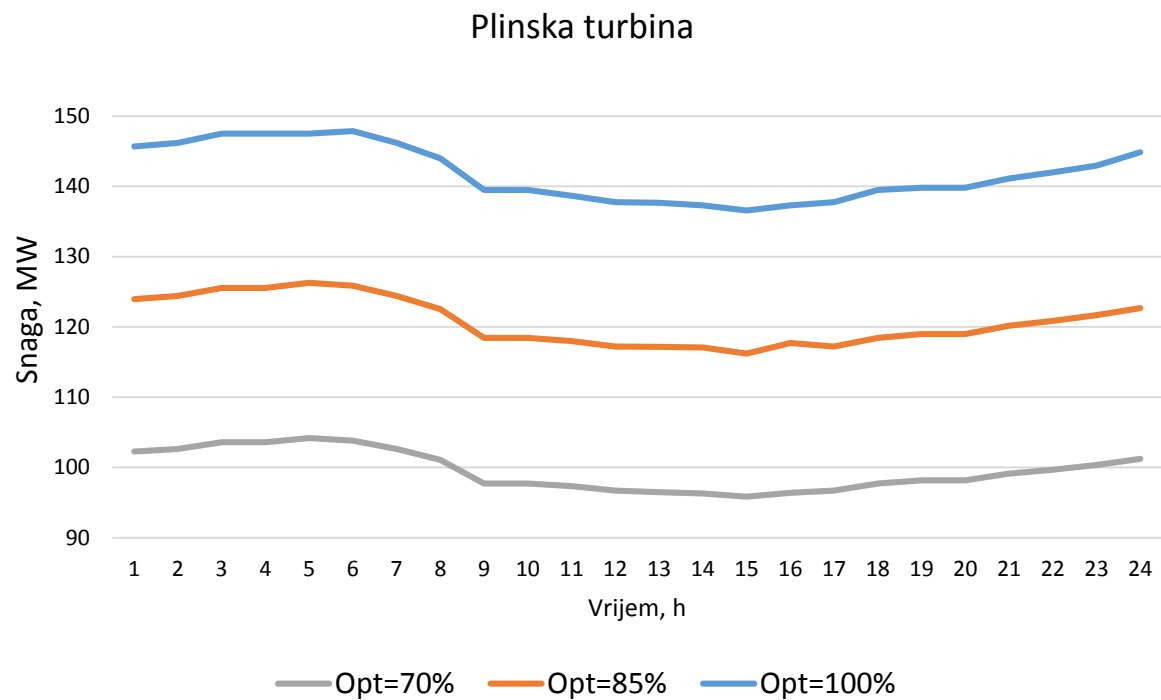
U ispisu rezultata proračuna koristiti će se prikazani raspored dnevne temperature za tri karakteristična dana u godini kako bi se simulirao rad bloka C u zimskom, ljetnom i prijelaznom periodu godine. Tijekom ispisa rezultata opterećenje je cijelo vrijeme konstantno tj. rezultati prikazuju tri različita opterećenja 70%, 85% i 100%. U daljnjem radu analizirat će se neke vrijednosti proračuna u ovisnosti o promjeni dnevne temperature za tri razdoblja godine.

#### 4.1. Ljetno razdoblje

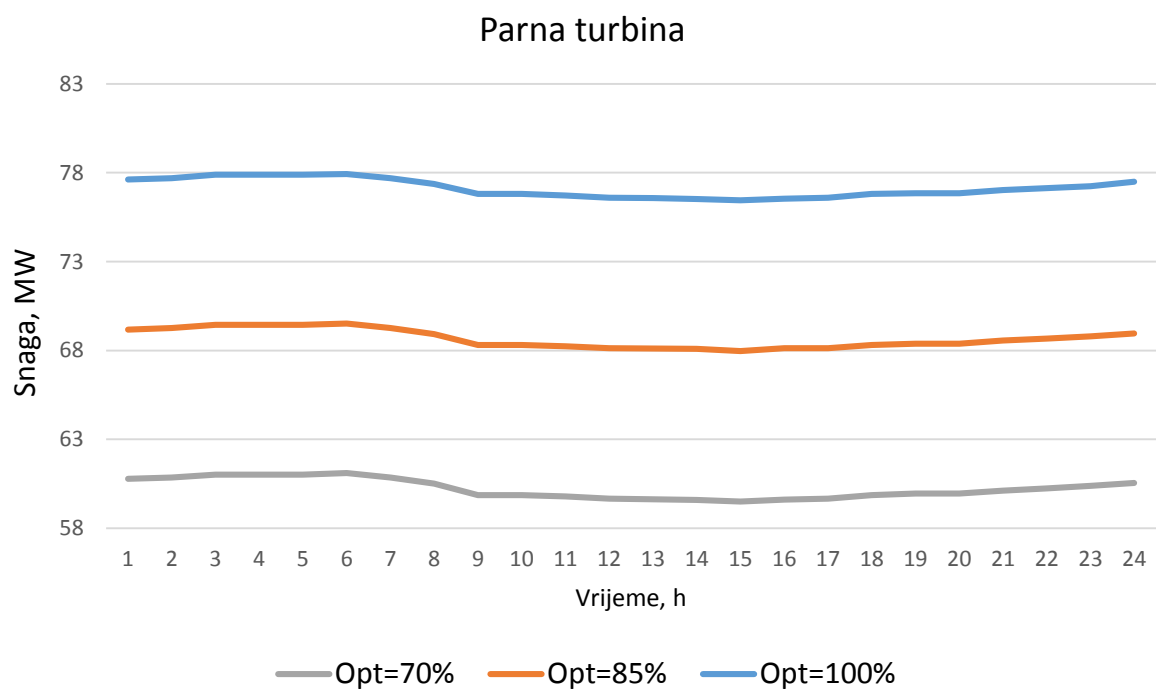
Za ljetno razdoblje izabran je karakterističan dan sa stranica Državnog hidrometeorološkog zavoda te su te temperature korištene tijekom proračuna. Na slici 20 crvenom bojom prikazana je promjena dnevne ljetne temperature. Vidljivo je da u noćnim satima u plinsku turbinu ulazi zrak temperature  $T_{1Z}=17^{\circ}\text{C}$  ( $T_{ok}$ ), a u dnevnom radu bloka C temperatura se za prikazani dan penje i do  $28^{\circ}\text{C}$ . U sljedećim slikama prikazane su dobivene vrijednosti modela izlaznih snaga za plinsku i parnu temperaturu te raspored temperatura u generatoru pare i iskoristivost postrojenja. Matematički model koristi satnu promjenu temperature zraka i daje izlazne vrijednosti kod konstantnog opterećenja. Iz sljedeće slike vidljiva je realna promjena protoka goriva za jedan ljetni dan u godini. Kod opterećenja od 100% model daje najveće vrijednosti protoka goriva dok se smanjivanjem opterećenja smanjuje i protok goriva. Zanimljivo je usporediti krivulju protoka sa krivuljom promjene temperature. U jutarnjim satima temperatura zraka počinje rasti. Porast temperature zraka odražava se na krivulju protoka tako što se protok smanjuje.



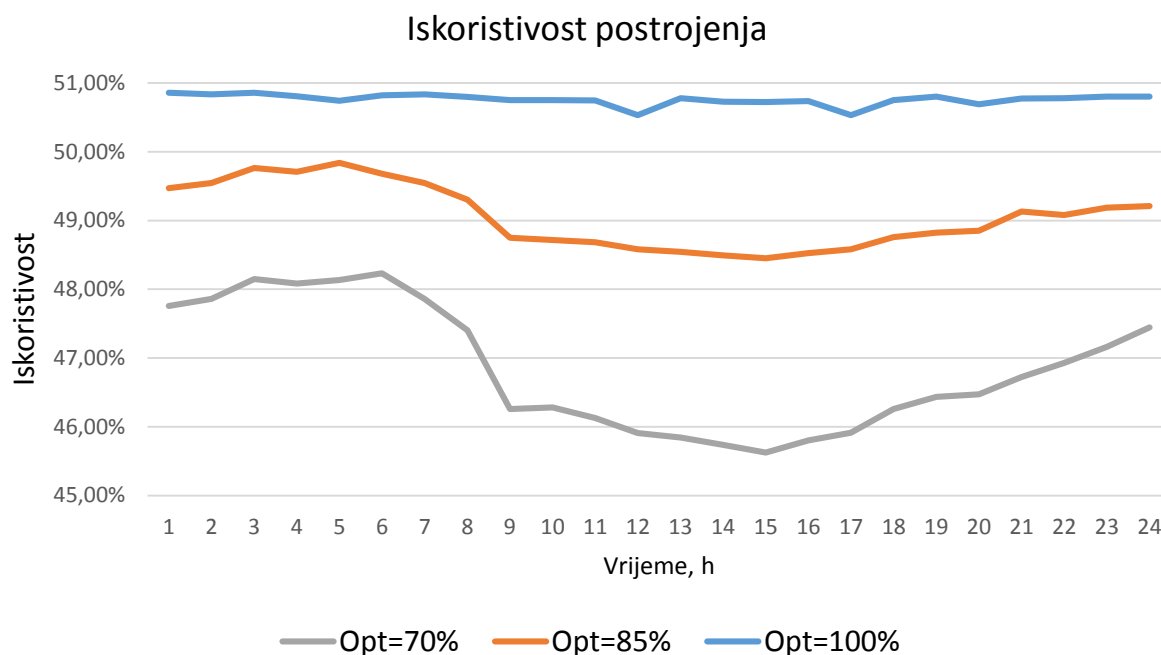
**Slika 21. Protok goriva u ovisnosti o vanjskoj temperaturi karakteristično za ljetno razdoblje**



**Slika 22. Snaga plinske turbine za karakterističan dan ljetnog perioda**



**Slika 23. Snaga parne turbine za karakterističan dan ljetnog perioda**



**Slika 24. Iskoristivost postrojenja za karakterističan dan ljetnog perioda**

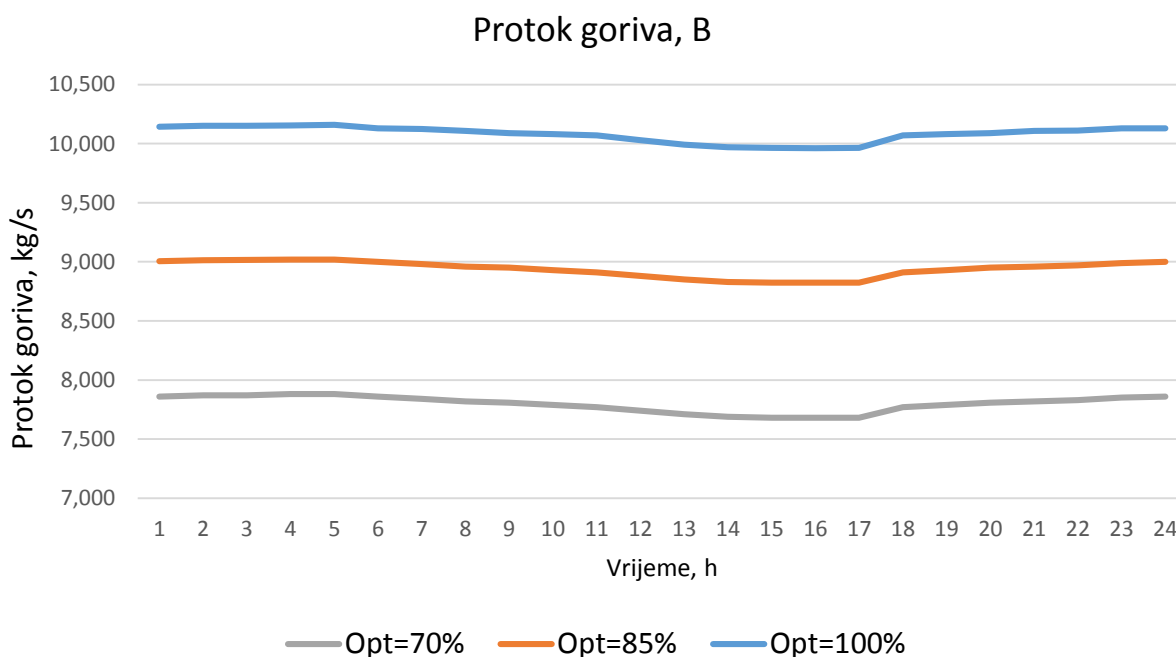
Slika 22 i slika 23 pokazuju dnevnu promjenu snage novog bloka u TE Sisak. Matematički model daje vrijednosti snage plinske i parne turbine u ovisnosti o opterećenju, vanjskoj temperaturi i protoku goriva. Može se primijetiti kako se kod manjeg opterećenja dobiva i manja proizvodnja električne energije.

Na slici 24 prikazana je dnevna promjena iskoristivosti kombi bloka. Iskoristivost ovakvih postrojenja dosežu vrijednosti i do 60 %. Iz prikazane slike vidljivo je da kod 100% opterećenja korisnost bloka veća od 50 %. Snižavanjem opterećenja opada i stupanj korisnosti. Kako su za 100% opterećenje podaci više linearni tako je i iskoristivost na prikazanoj slici 24 linearna. Npr. kod vanjske ulazne temperature od  $+10,7^{\circ}\text{C}$  snaga plinske turbine na stezaljkama generatora iznosi 152,2 MW dok je protok goriva 9,82 kg/s. Kod 100 % opterećenja i vanjske temperature od  $+38^{\circ}\text{C}$  snaga na stezaljkama generatora je 127,7 MW, a protok goriva je 8,67 kg/s. Vidljivo je kako je snazi na stezaljkama generatora proporcionalan i pad u potrošnji goriva. Međutim, kod manjeg opterećenja to nije slučaj što ima utjecaj na promjenjivi karakter iskoristivosti postrojenja. Kod 70% opterećenja i vanjske temperature od  $+10,7^{\circ}\text{C}$  snaga plinske turbine na stezaljkama generatora iznosi 107 MW, a protok goriva je 7,56 kg/s. Kada je vanjska temperatura  $+38^{\circ}\text{C}$ , snaga plinske turbine na stezaljkama generatora se smanji na 89,6 MW dok je protok goriva samo nešto manji te iznosi 7,35 kg/s. Upravo zbog neproporcionalnosti protoka goriva pri nižim opterećenjima imamo promjenjivu iskoristivost

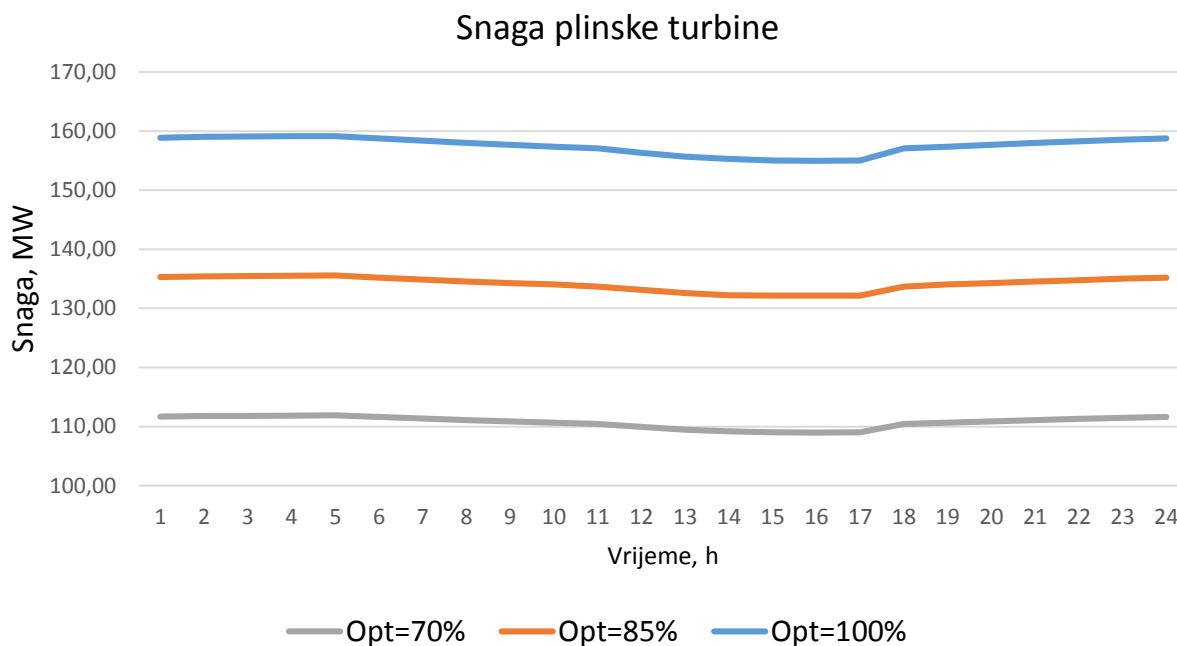
kombi ciklusa. Također kod manjih opterećenja imamo manju temperaturu i manji protok dimnih plinova te tako dobijemo manju snagu na parno-turbinskom dijelu što rezultira većim odstupanjem iskoristivosti postrojenja.

#### 4.2. Zimsko razdoblje

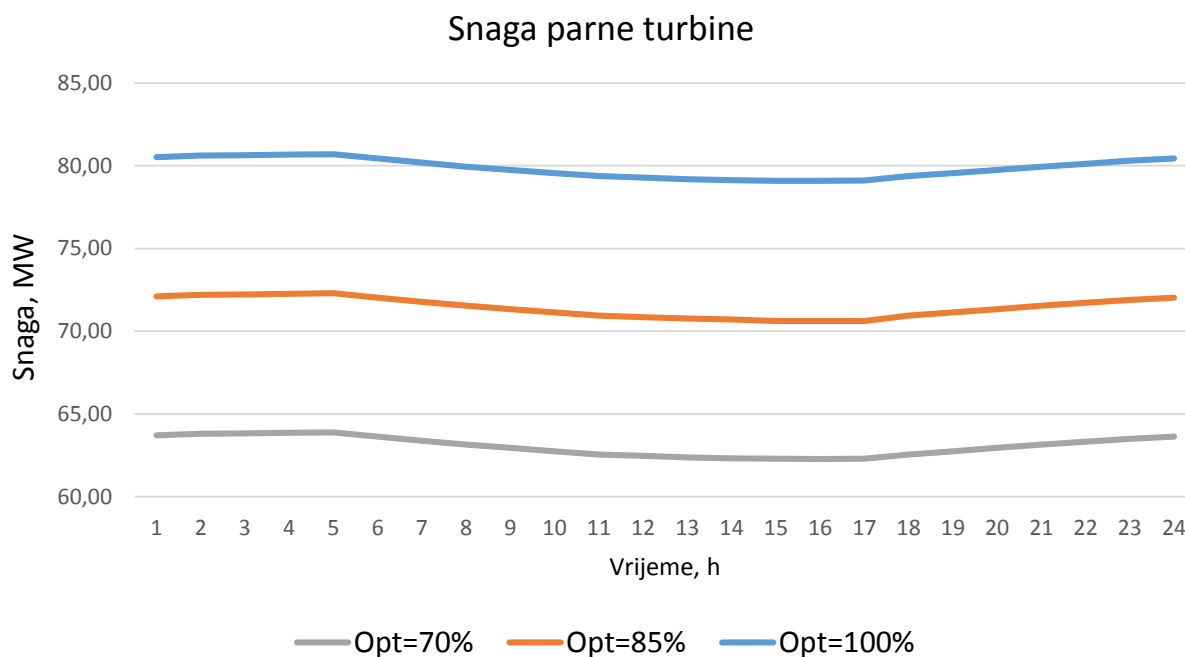
Za razliku od ljetnog perioda, zimski period ima jednoličniju promjenu protoka goriva u ovisnosti opterećenju i vanjske temperature. Temperatura okoliša u noćnima satima iznosi oko  $-5^{\circ}\text{C}$  dok se u danu penje i do  $8^{\circ}\text{C}$ . Može se primijetiti pad snage kod viših dnevnih temperatura. Kod potpunog opterećenja protok goriva doseže vrijednosti iznad  $10\text{ kg/s}$  dok kod manjih opterećenja protok goriva opada ispod  $8\text{ kg/s}$ . Utjecaj protoka goriva i okolišne temperature na snagu bloka prikazan je na slici 26 i 27. Ispisom rezultata modela vidljivo je da blok najveće snage doseže u zimskim mjesecima. Tijekom porasta dnevne temperature dolazi do blagog pada u snazi plinske i parne turbine. Iskoristivost postrojenja prikazuje slika 28.



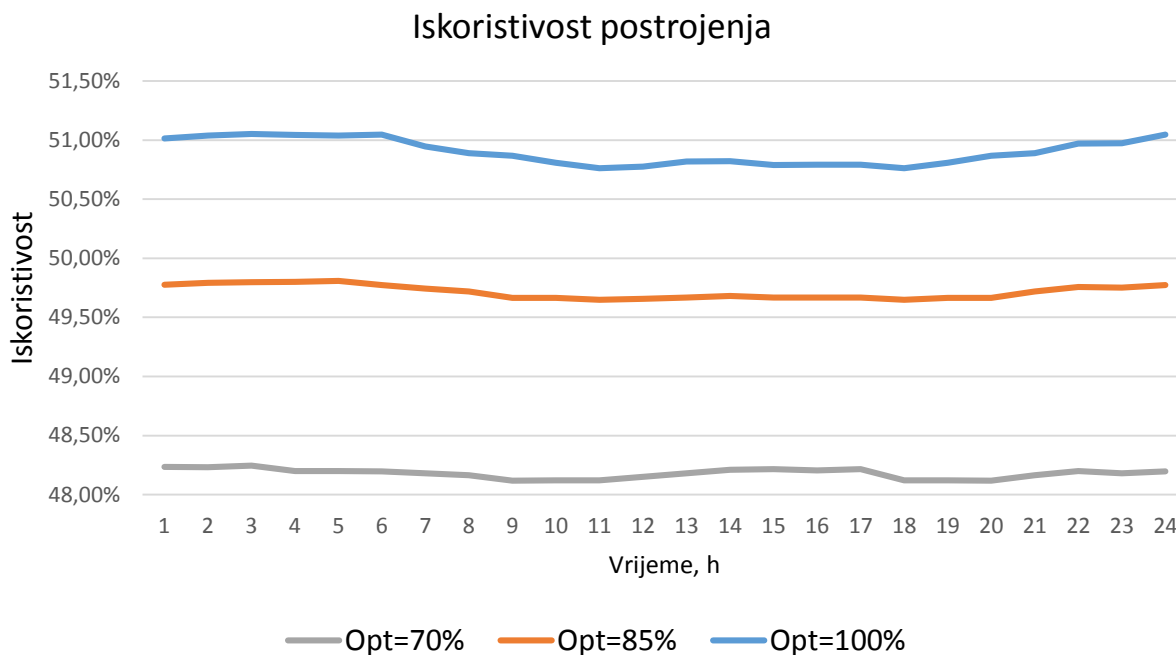
**Slika 25. Protok goriva u ovisnosti o vanjskoj temperaturi karakteristično za zimsko razdoblje**



Slika 26. Snaga plinske turbine za karakterističan dan zimskog perioda



Slika 27. Snaga parne turbine za karakterističan dan zimskog perioda



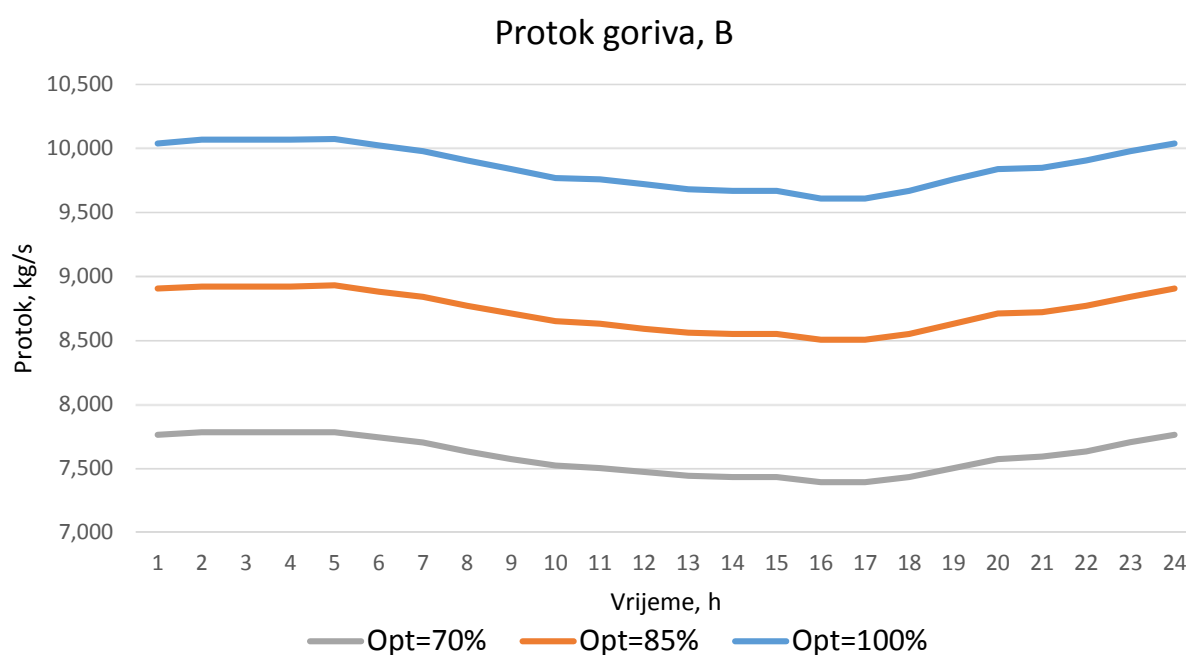
**Slika 28. Iskoristivost postrojenja za karakterističan dan zimskog perioda**

Iz slike 28 vidljivo je kako kod 100% opterećenja bloka dolazi do pada iskoristivosti dok je kod nižih opterećenja iskoristivost relativno konstantnog iznosa. Razlog tome je da su ulazni podaci, npr. protok goriva, koji su dobiveni od Termoelektrane Sisak, kod nižih opterećenja konstantnijeg iznosa dok su kod viših opterećenja više promjenjivi u ovisnosti o vanjskoj temperaturi.

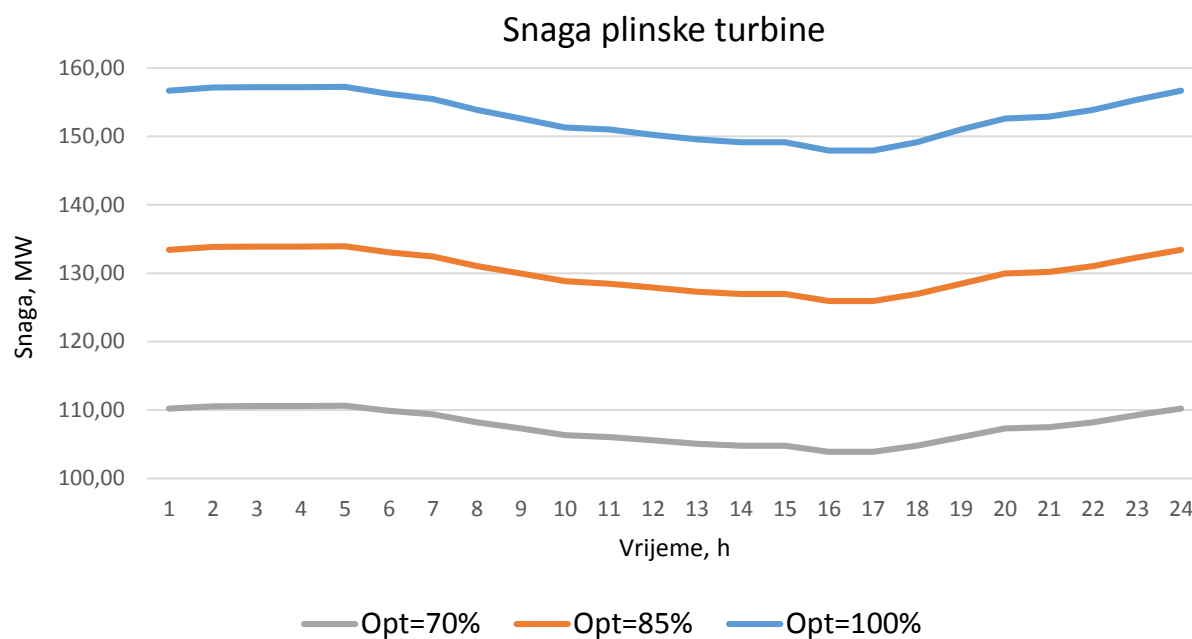


### 4.3. Prijelazno razdoblje

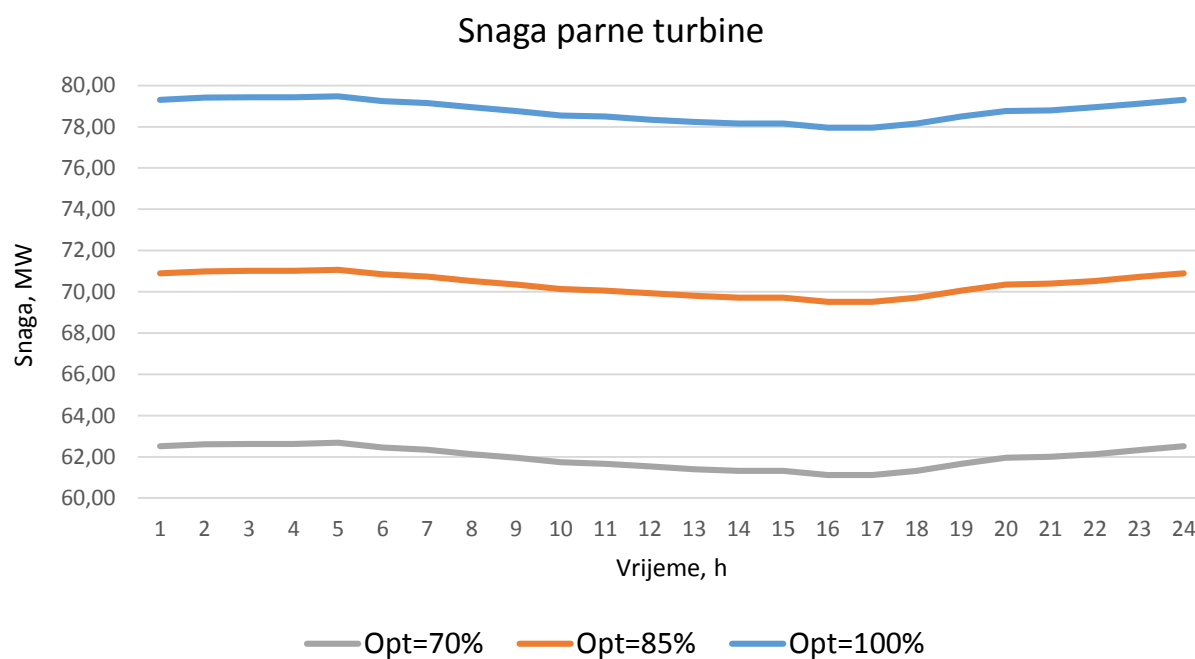
Za prijelazno razdoblje izabran je karakterističan dan kojem temperatura varira od 4 do 15°C. Na slici 20 zelenom bojom prikazana je promjena dnevne prijelazne temperature. U sljedećim slikama prikazane su dobivene vrijednosti modela izlaznih snaga za plinsku i parnu temperaturu te raspored temperatura u generatoru pare i iskoristivost postrojenja.



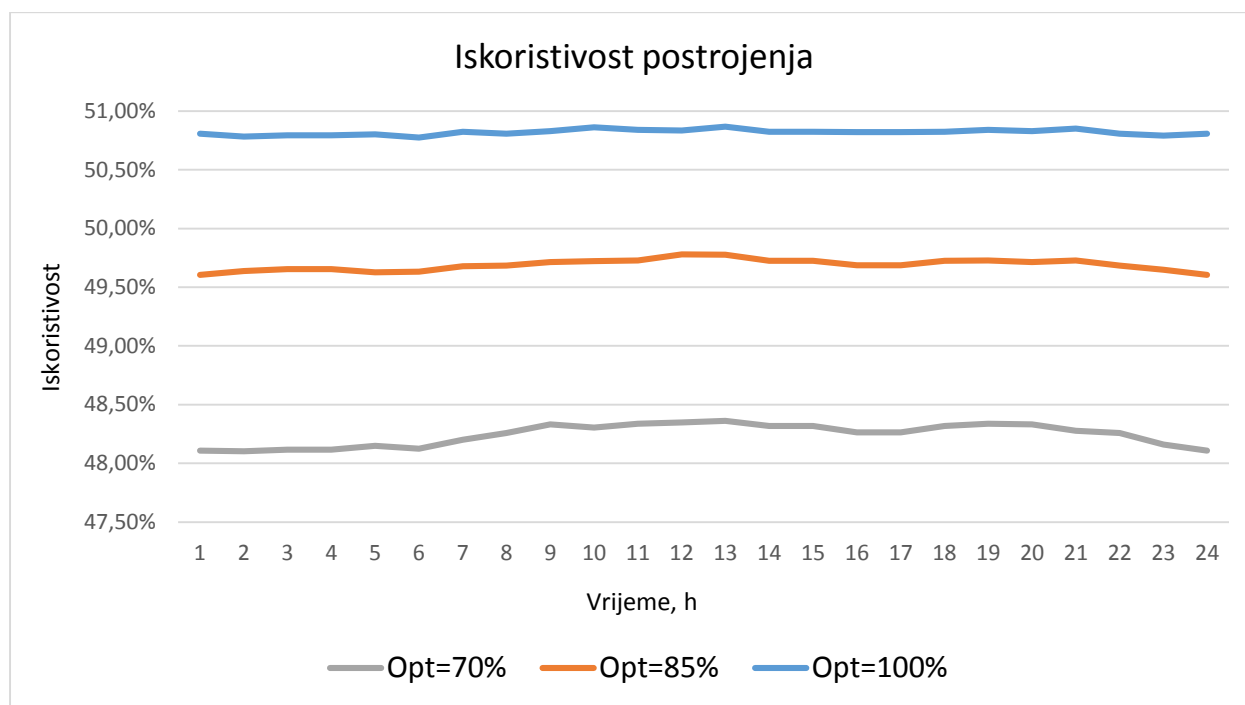
**Slika 29. Protok goriva u ovisnosti o vanjskoj temperaturi karakteristično za prijelazno razdoblje**



**Slika 30. Snaga plinske turbine za karakterističan dan prijelaznog perioda**



**Slika 31. Snaga parne turbine za karakterističan dan prijelaznog perioda**



**Slika 32. Iskoristivost postrojenja za karakterističan dan prijelaznog perioda**

Iz slike je vidljivo da kod 70% opterećenja dolazi do blagog porasta iskoristivosti. Razlog tomu je manja količina goriva koja utječe na iskoristivost kod datog opterećenja i temperature za prijelazno razdoblje.

Moguće je uočiti kako na pojedinim dijagramima postoji maleno odstupanje od stvarnih vrijednosti. Kako neki podaci (npr. nazivni protok pare, izlazna temperatura pare i izlazni tlakovi visokotlačnog i niskotlačnog kruga pare) nisu u potpunosti dobiveni od TE Sisak, za potrebe ovog proračuna te su vrijednosti interpolirane između postojećih. To može uzrokovati male promjene u rezultatima što je vidljivo iz prethodnih slika. Može se reći, kako bez obzira na mala odstupanja od realnih rezultata, model i dalje daje približno točne izlazne podatke dobivene matematičkim proračunom.

## 5. ANALIZA ISPLATIVOSTI PROIZVODNJE BLOKA C U KARAKTERISTIČNOM LJETNOM, ZIMSKOM I PRIJELAZNOM RAZDOBLJU

Tijekom analize troškova u daljnjem radu analizirat će se trošak odnosno zarada od proizvodnje električne energije za karakteristična razdoblja u godini. Kako blok C trenutno neće proizvoditi toplinsku energiju za potrebe grada Siska u radu će se analizirati troškovi proizvodnje električne energije. U analizi isplativosti pokazat će se kako cijena dnevne i noćne tarife utječu na isplativost proizvodnje električne energije. U matematičkom modelu za izračun profita tijekom noćnih sati pretpostavljeno je da elektrana radi s minimalnim opterećenjem od 70%. Minimalno opterećenje, u noćnim satima rada bloka, uzeto je iz razloga da se smanje gubici proizvodnje električne energije zbog niske noćne tarife po kojoj se prodaje električna energija, te zbog pretpostavke da je potreba za proizvodnjom električne energije manja u odnosu na dnevni period. U dnevnom razdoblju, od 7 – 21 h, u matematičkom modelu uzeto je da elektrana radi pod 100% opterećenjem iz razloga jer se pretpostavlja da je potražnja za električnom energijom veća nego u noćnim satima rada elektrane tj. bloka C. Također je u dnevnom periodu rada bloka C, veća tarifa prodaje električne energije te je iz razloga da se ostvari veći profit uzeto 100% opterećenje bloka. Također je za karakteristično razdoblje u godini satno mijenjana temperatura i protok goriva kao što je pokazano u prethodnom poglavlju.

Ulazni podaci koji su korišteni tijekom proračuna prikazani su u sljedećoj tablici:

	Dnevna tarifa	Noćna tarifa	jedinica
I slučaj	40	40	€/MWh
II slučaj	75	50	€/MWh
III slučaj	100	60	€/MWh
Ogrjevna vrijednost plina	0,046261		GJ/kg
Cijena plina	11		€/GJ

**Tablica 4. Vrijednosti korištene prilikom proračuna zarade TE Sisak**

Prikazani podaci korišteni su tijekom analize gubitaka i prikaza zarade kombi bloka. Važno je napomenuti kako podaci iz tablice 4 nisu potpuno točni jer ovise o tržištu električne energije i stalno variraju. Za prilike ovog proračuna uzete su vrijednosti tri različite tarife u tri različita slučaja prodaje električne energije u svrhu pokazivanja kako tržišna cijena prodaje električne energije utječe na poslovanje bloka C kod konstantne cijene plina.

Potrošnja goriva računa se prema:

$$S_G = H_d \cdot 3600 \cdot B \cdot C_g \quad (5.1)$$

Gdje je :

$S_G$	Satni trošak goriva [€/h]
$H_d$	Ogrjevnost goriva [GJ/kg]
$B$	Protok goriva [kg/s]
$C_g$	Cijena goriva (plina) [€/GJ]

Ukupna dobit kombi postrojenja posebno se računa za dnevnu i noćnu tarifu prema:

$$S_{el} = S_{DT} - S_G \quad (5.2)$$

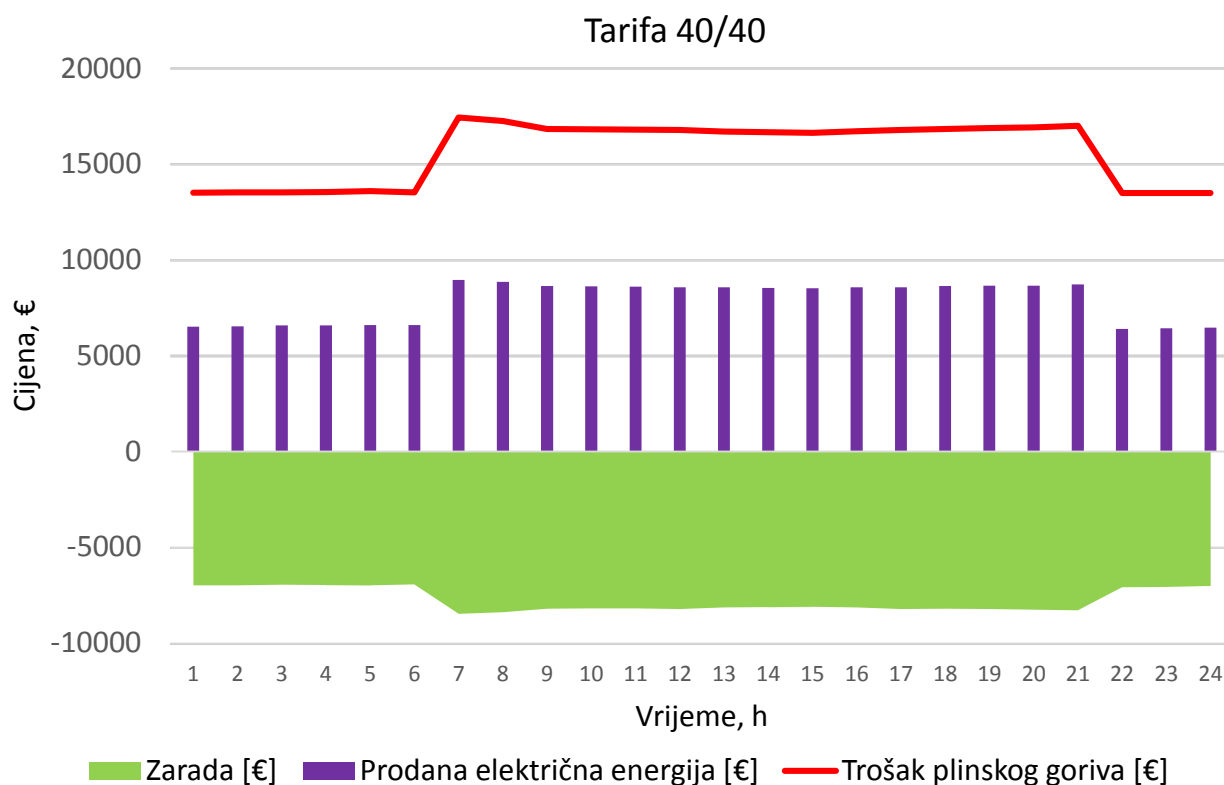
$$S_{el} = S_{NT} - S_G \quad (5.3)$$

Gdje je :

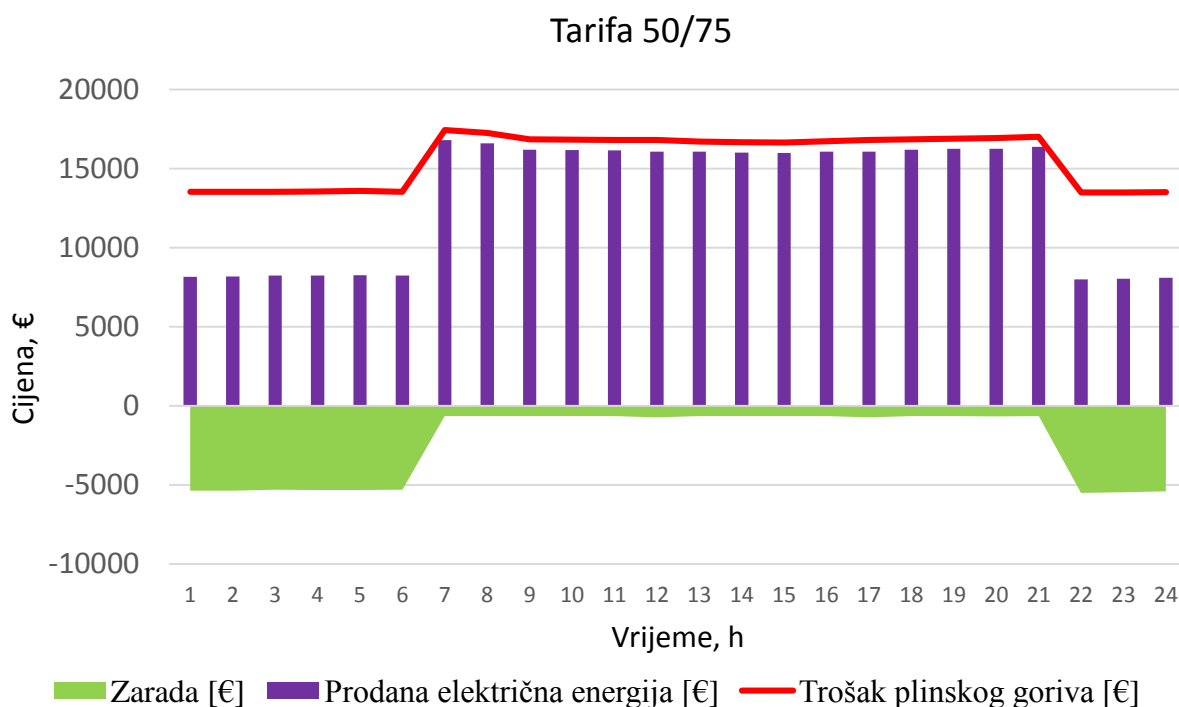
$S_{el}$	Ukupna dobit postrojenja [€/h]
$S_{DT}$	Dobit od prodane el. energije za dnevnu tarifu [€/h]
$S_{NT}$	Dobit od proizvedene el. energije za noćnu tarifu [€/h]

## 5.1. Ljetni period

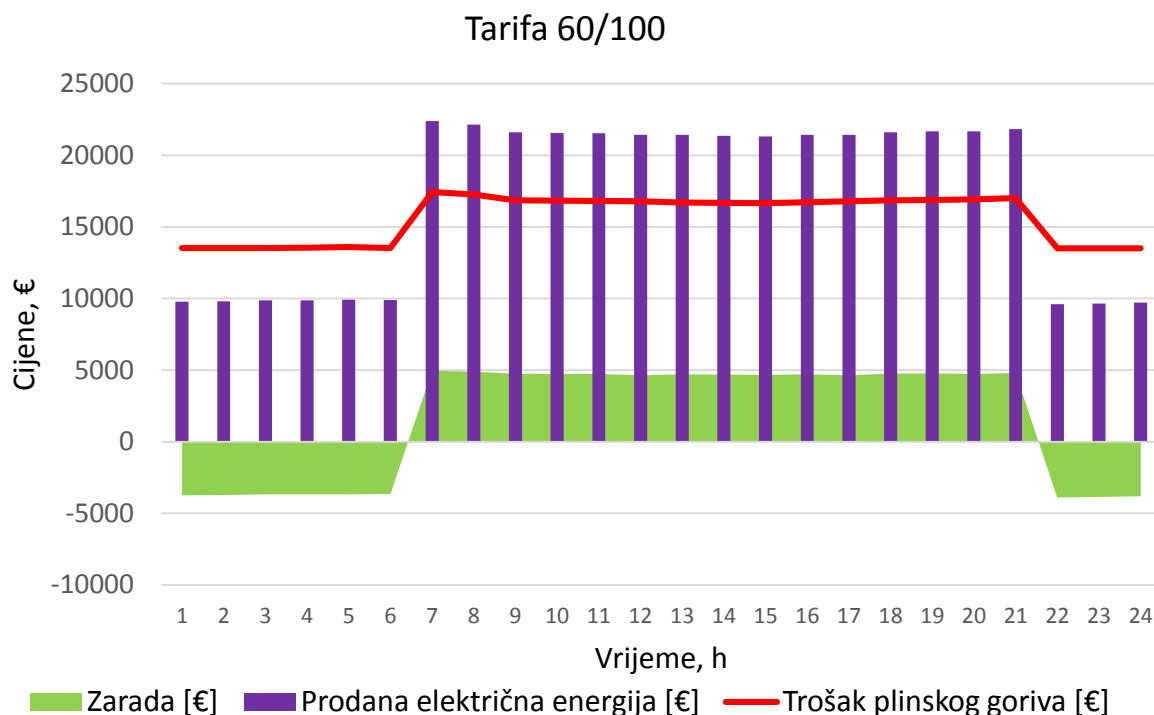
Izračun zarade, tj. prikaz gubitaka koji se akumuliraju zbog premale tarife po kojoj se prodaje električna energija prikazane su slici 33, slici 34 i slici 35. U ovom radu analizirana je proizvodnja električne energije za tri slučaja. U prvom slučaju, kako pokazuje tablica 4, pretpostavljena je ista niskotarifna i visokotarifna cijena električne energije od 40 €/MWh. U drugom slučaju, koji je nešto povoljniji, za niskotarifnu cijenu električne energije uzeta je vrijednost od 50 €/MWh, a za visokotarifnu cijenu uzeto je 75 €/MWh. Zadnji slučaj je najpovoljniji gledajući isplativost proizvodnje jer se u tom slučaju električna energija u noćnim satima prodaje po 60 €/MWh, a u dnevnim satima po 100 €/MWh. Tijekom noćnog perioda pretpostavlja se da su potrebe za električnom energijom manje nego u dnevnim satima. Iz tog razloga u noćnom radu, od 21 do 7 h, pretpostavljeno je da blok C radi s minimalnim opterećenjem od 70%. Drugi razlog zbog kojeg blok radi s minimalnim opterećenjem je da ako je odnos cijene struje i plina nepovoljan onda se u tom periodu stvara gubitak te je poželjno ugasiti postrojenje ili ga kao u ovom slučaju staviti na minimum. Tijekom dnevnog perioda, od 7 – 21h, elektrana radi na 100 % opterećenja. Protok goriva kao i ulazna temperatura koja ulazi u kompresor plinskog agregata promjenjivi su na satnoj osnovi. Slika 33 prikazuje nam gubitak proizvodnje električne energije bloka C. Tijekom ljetnog period u prvom slučaju prikazanom na slici 33 matematički model daje satnu promjenjivost goriva i izlazne snage plinske i parne turbine. Na osnovu tih podataka ukupni dnevni trošak goriva iznosi 374980,73 € dok je prodajom električne energije zarađeno 188483,36 €. Razlikom ove dvije vrijednosti dobivamo dnevnu zaradu odnosno gubitak u jednom karakterističnom ljetnom danu koji iznosi - 186497,37 €. Također je moguće uočiti i trošak goriva koji opada s padom opterećenja plinske turbine, što je i očekivano zbog manje masene količine utrošenog goriva. Moguće je zaključiti kako je neisplativo da elektrana radi kada dnevna i noćna tarifa iznosi 40 €/MWh.



**Slika 33. Prikaz gubitaka u ljetnom periodu kod proizvodnje električne energije kada dnevna i noćna tarifa iznose 40 €/MWh**



**Slika 34. Prikaz gubitaka u ljetnom periodu kod proizvodnje električne energije kada je niskotarifna cijena električne energije 50 €/MWh, a visokotarifna 75 €/MWh**

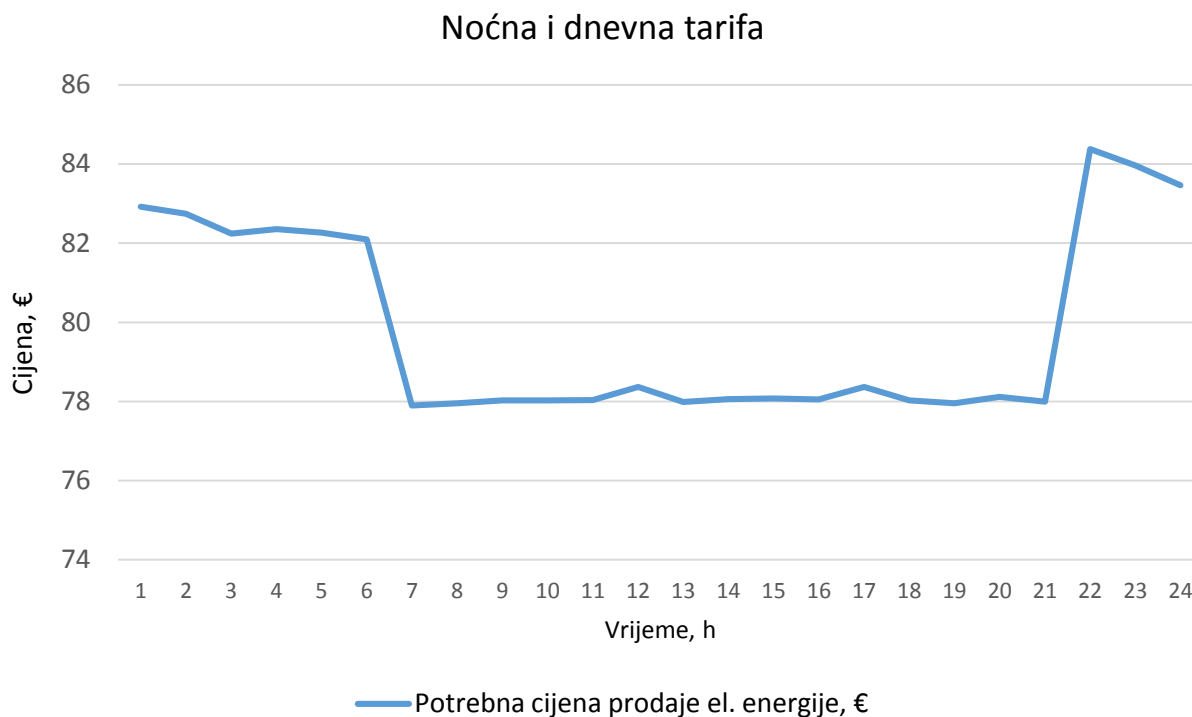


**Slika 35. Prikaz dobiti u ljetnom periodu kod proizvodnje električne energije kada je niskotarifna cijena električne energije 60 €/MWh, a visokotarifna 100 €/MWh**

Prilikom proizvodnje električne energije po tarifnom sustavu 50/75 €/MWh i dalje je vidljiva neisplativost proizvodnje. Zarada od dnevne prodaje električne energije iznosi 316697,6 € dok je dnevni gubitak nešto manji te iznosi -58283,08 €. Može se uočiti kako je u drugom slučaju gubitak nešto manji u usporedbi s prvim slučajem.

Kada prodajemo električnu energiju po niskotarifnom sustavu za 60€/MWh, a po visokotarifnom sustavu za 100 €/MWh uočavaju se dobiti. Ukupna dnevni profit od prodaje električne energije iznosi 412474,56 €. Dnevna zarada u trećem slučaju iznosi 37493,83 €. Iz slike 35 može se i dalje uočiti kako u noćnom periodu blok C posluje s gubicima dok je u dnevnom periodu ostvarena dobit koja u konačnici utječe da cjelodnevna zarada bude u plusu za taj dan.





**Slika 36. Potrebna cijena dnevne i noćne tarife kako bi blok C konstantno bio u dobitku za ljetno razdoblje**

Zanimljivo je pokazati kolika bi cijena prodaje električne energije trebala biti kako bi blok cijelo vrijeme radio s dobitkom. Slika 36 pokazuje kako je dnevna cijena od 78 €/MWh dovoljna da TE Sisak (blok C) posluje pozitivno. U noćnim satima situacija je malo drugačija s obzirom na to da elektrana ne radi pod opterećenjem od 100% te je time i iskoristivost nešto manja. U tablicama 5, 6 i 7 prikazani su rezultati modela i satni izračun zarade.

**Tablica 5. Dnevni gubitak proizvodnje električne energije u ljetnom periodu kada noćna i dnevna tarifa prodaje električne energije iznosi 40 €/MWh**

Vrijeme	Protok goriva, B	Snaga plinske turbine	Snaga parne turbine	Ukupna snaga bloka C	Zarada od prodaje el. energije	Cijena goriva	Zarada	
h	kg/s	MW	MW	MW	€	€	€	
1	7,38	102,27	60,78	163,05	6521,84	13519,68	-6997,84	40 €/MWh
2	7,39	102,65	60,86	163,51	6540,20	13528,84	-6988,64	
3	7,39	103,58	61,03	164,61	6584,20	13538,00	-6953,80	
4	7,40	103,58	61,03	164,61	6584,20	13556,32	-6972,12	
5	7,42	104,20	61,03	165,23	6609,00	13592,96	-6983,96	
6	7,39	103,80	61,10	164,90	6596,00	13538,00	-6942,00	
7	9,52	146,20	77,69	223,89	8955,60	17440,03	-8484,43	40 €/MWh
8	9,42	144,00	77,37	221,37	8854,80	17256,83	-8402,03	
9	9,20	139,20	76,78	215,98	8639,16	16851,98	-8212,82	
10	9,19	138,92	76,74	215,66	8626,40	16828,16	-8201,76	
11	9,17	138,65	76,71	215,36	8614,40	16806,18	-8191,78	
12	9,17	137,76	76,60	214,36	8574,40	16798,85	-8224,45	
13	9,12	137,66	76,58	214,24	8569,60	16707,25	-8137,65	
14	9,10	137,03	76,51	213,54	8541,44	16668,78	-8127,34	
15	9,09	136,75	76,45	213,20	8528,00	16644,97	-8116,97	
16	9,13	137,66	76,58	214,24	8569,64	16721,91	-8152,27	
17	9,17	137,76	76,60	214,36	8574,40	16798,85	-8224,45	
18	9,20	139,20	76,77	215,97	8638,80	16851,98	-8213,18	
19	9,22	139,83	76,85	216,68	8667,20	16890,45	-8223,25	
20	9,24	139,83	76,85	216,68	8667,20	16927,08	-8259,88	
21	9,29	141,19	77,02	218,21	8728,48	17018,68	-8290,20	
22	7,37	99,69	60,25	159,94	6397,60	13495,87	-7098,27	40 €/MWh
23	7,37	100,37	60,38	160,75	6430,00	13497,70	-7067,70	
24	7,37	101,22	60,55	161,77	6470,80	13501,37	-7030,57	
UKUPNO:					188483,3	374980,7	-186497,3	

**Tablica 6. Dnevni gubitak proizvodnje električne energije u ljetnom periodu kod noćne tarife od 50 €/MWh i dnevne tarife od 75 €/MWh**

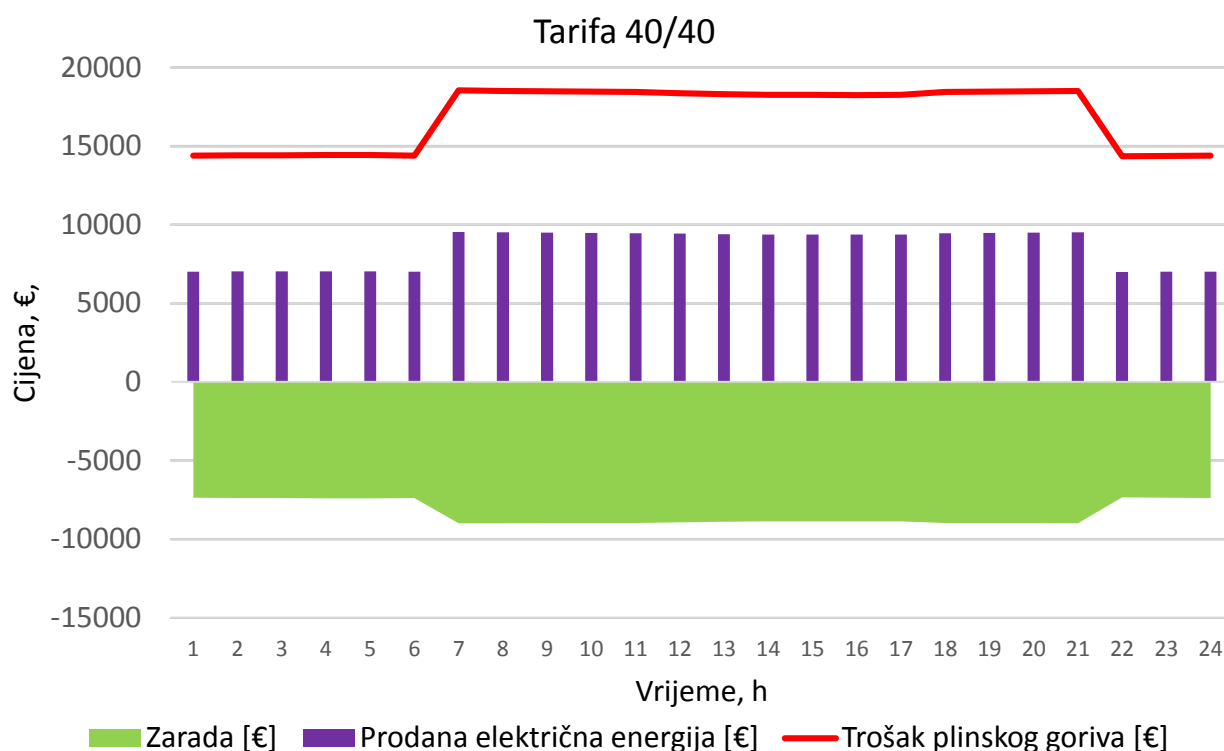
Vrijeme	Protok goriva, B	Snaga plinske turbine	Snaga parne turbine	Ukupna snaga bloka C	Zarada od prodaje el. energije	Cijena goriva	Zarada	
h	kg/s	MW	MW	MW	€	€	€	
1	7,38	102,27	60,78	163,05	8152,30	13519,68	-5367,38	50€/MWh
2	7,39	102,65	60,86	163,51	8175,25	13528,84	-5353,59	
3	7,39	103,58	61,03	164,61	8230,25	13538,00	-5307,75	
4	7,40	103,58	61,03	164,61	8230,25	13556,32	-5326,07	
5	7,42	104,20	61,03	165,23	8261,25	13592,96	-5331,71	
6	7,39	103,80	61,10	164,90	8245,00	13538,00	-5293,00	
7	9,52	146,20	77,69	223,89	16791,75	17440,03	-648,28	75 €/MWh
8	9,42	144,00	77,37	221,37	16602,75	17256,83	-654,08	
9	9,20	139,20	76,78	215,98	16198,43	16851,98	-653,55	
10	9,19	138,92	76,74	215,66	16174,50	16828,16	-653,66	
11	9,17	138,65	76,71	215,36	16152,00	16806,18	-654,18	
12	9,17	137,76	76,60	214,36	16077,00	16798,85	-721,85	
13	9,12	137,66	76,58	214,24	16068,00	16707,25	-639,25	
14	9,10	137,03	76,51	213,54	16015,20	16668,78	-653,58	
15	9,09	136,75	76,45	213,20	15990,00	16644,97	-654,97	
16	9,13	137,66	76,58	214,24	16068,08	16721,91	-653,83	
17	9,17	137,76	76,60	214,36	16077,00	16798,85	-721,85	
18	9,20	139,20	76,77	215,97	16197,75	16851,98	-654,23	
19	9,22	139,83	76,85	216,68	16251,00	16890,45	-639,45	
20	9,24	139,83	76,85	216,68	16251,00	16927,08	-676,08	
21	9,29	141,19	77,02	218,21	16365,90	17018,68	-652,78	
22	7,37	99,69	60,25	159,94	7997,00	13495,87	-5498,87	50 €/MWh
23	7,37	100,37	60,38	160,75	8037,50	13497,70	-5460,20	
24	7,37	101,22	60,55	161,77	8088,50	13501,37	-5412,87	
UKUPNO:					316697,7	374980,7	-58283,1	

**Tablica 7. Dnevni dobitak proizvodnje električne energije u ljetnom periodu kod noćne tarife od 60 €/MWh i dnevne tarife od 100 €/MWh**

Vrijeme	Protok goriva, B	Snaga plinske turbine	Snaga parne turbine	Ukupna snaga bloka C	Zarada od prodaje el. energije	Cijena goriva	Zarada	
h	kg/s	MW	MW	MW	€	€	€	
1	7,38	102,27	60,78	163,05	9782,76	13519,68	-3736,92	60€/MWh
2	7,39	102,65	60,86	163,51	9810,30	13528,84	-3718,54	
3	7,39	103,58	61,03	164,61	9876,30	13538,00	-3661,70	
4	7,40	103,58	61,03	164,61	9876,30	13556,32	-3680,02	
5	7,42	104,20	61,03	165,23	9913,50	13592,96	-3679,46	
6	7,39	103,80	61,10	164,90	9894,00	13538,00	-3644,00	
7	9,52	146,20	77,69	223,89	22389,00	17440,03	4948,97	100 €/MWh
8	9,42	144,00	77,37	221,37	22137,00	17256,83	4880,17	
9	9,20	139,20	76,78	215,98	21597,90	16851,98	4745,92	
10	9,19	138,92	76,74	215,66	21566,00	16828,16	4737,84	
11	9,17	138,65	76,71	215,36	21536,00	16806,18	4729,82	
12	9,17	137,76	76,60	214,36	21436,00	16798,85	4637,15	
13	9,12	137,66	76,58	214,24	21424,00	16707,25	4716,75	
14	9,10	137,03	76,51	213,54	21353,60	16668,78	4684,82	
15	9,09	136,75	76,45	213,20	21320,00	16644,97	4675,03	
16	9,13	137,66	76,58	214,24	21424,10	16721,91	4702,19	
17	9,17	137,76	76,60	214,36	21436,00	16798,85	4637,15	
18	9,20	139,20	76,77	215,97	21597,00	16851,98	4745,02	
19	9,22	139,83	76,85	216,68	21668,00	16890,45	4777,55	
20	9,24	139,83	76,85	216,68	21668,00	16927,08	4740,92	
21	9,29	141,19	77,02	218,21	21821,20	17018,68	4802,52	
22	7,37	99,69	60,25	159,94	9596,40	13495,87	-3899,47	60 €/MWh
23	7,37	100,37	60,38	160,75	9645,00	13497,70	-3852,70	
24	7,37	101,22	60,55	161,77	9706,20	13501,37	-3795,17	
				UKUPNO:	412474,6	374980,7	37493,8	

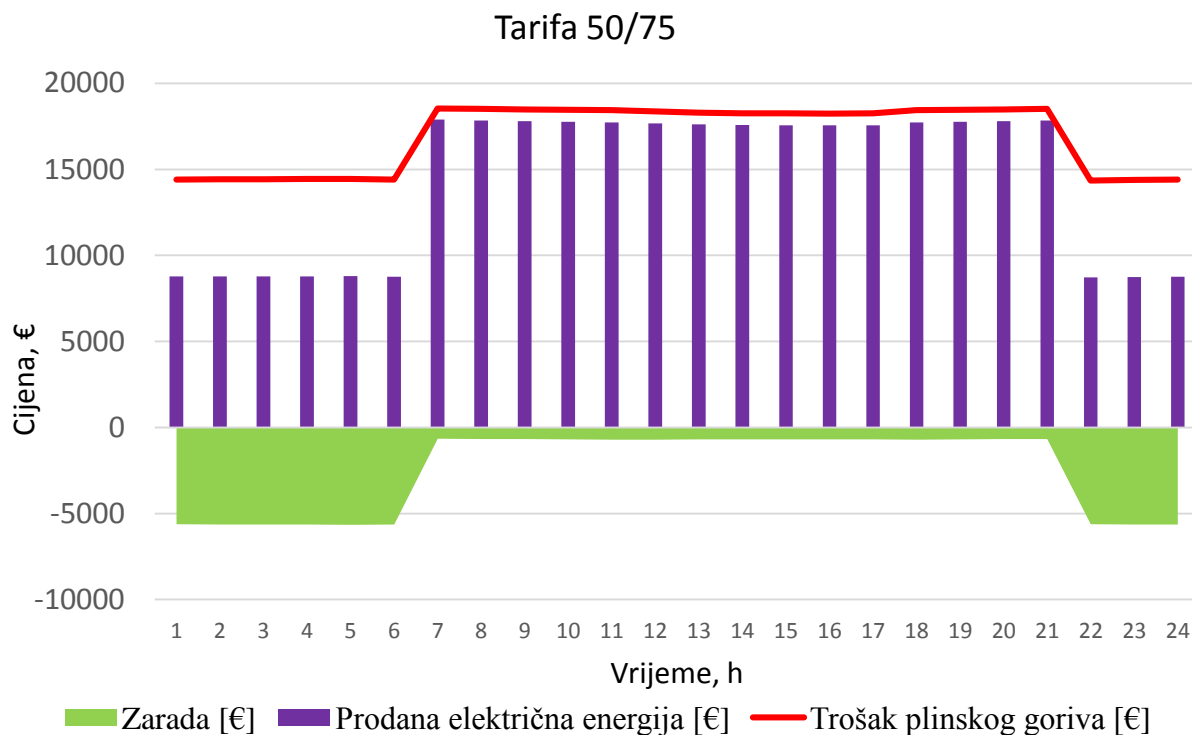
## 5.2. Zimski period

Tijekom zimskog perioda potrebe za toplinskom energijom su veće nego u već prikazanom ljetnom razdoblju, ali se u ovom radu neće uzeti u obzir zbog nedostatka informacija vezanih uz potrebe za grijanjem grada Siska. Kao i za ljetno razdoblje uzete su tri tarife prikazane u tablici 4 te su u slikama koje slijede pokazni rezultati proračuna. Matematički model daje nešto veće vrijednosti potrošnje goriva za karakteristični zimski dan. Za prvi slučaj vidljivo je da je potrošnja goriva nešto veća u usporedbi s istim slučajem prodaje električne energije po niskotarifnom sustavu kao i u ljetnim danima. Također se može primijetiti da je i gubitak nešto veći nego kod ljetnih dana, a iznosi -200839,62 €.

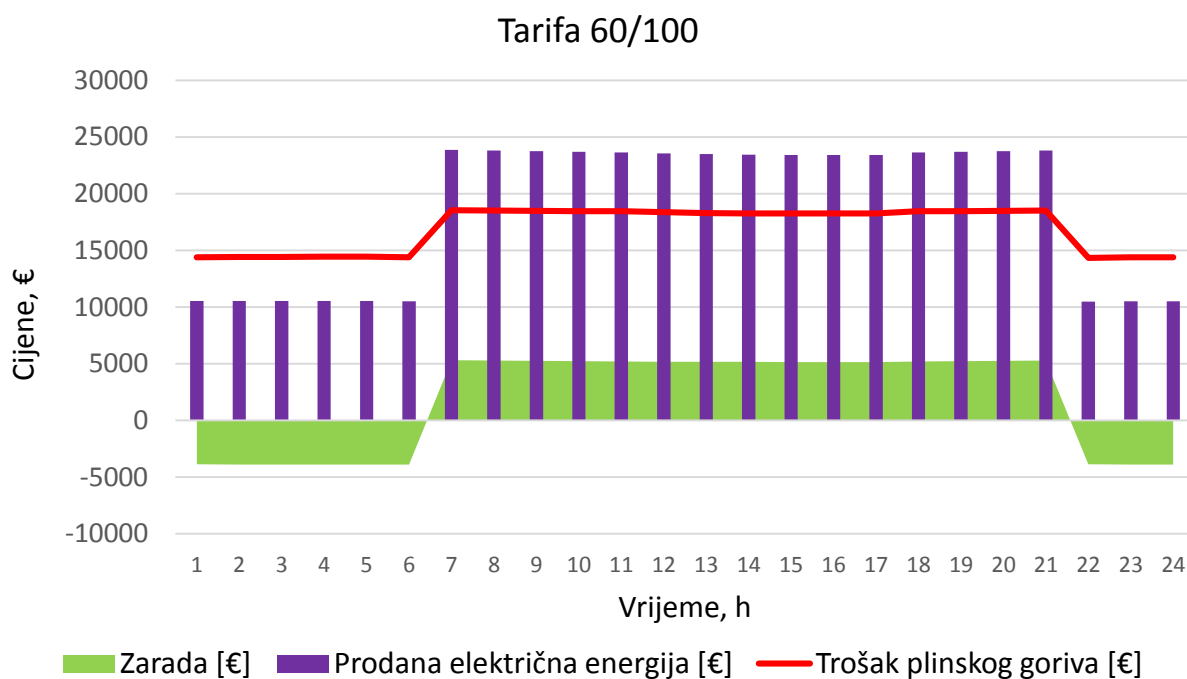


**Slika 37. Prikaz gubitaka u zimskom periodu kod proizvodnje električne energije kada dnevna i noćna tarifa iznose 40 €/MWh**

Na sljedeće dvije slike ponovno možemo vidjeti prikaz novčane dobiti. Iz slike 39 i tablice 10 moguće je zaključiti kako kombi postrojenje najbolje radi u zimskom periodu i ostvaruje najveću dobit kad je tarifa prodaje električne energije povoljna.



**Slika 38. Prikaz gubitaka u zimskom periodu kod proizvodnje električne energije kada je niskotarifna cijena električne energije 50 €/MWh, a visokotarifna 75 €/MWh**



**Slika 39. Prikaz dobiti u zimskom periodu kod proizvodnje električne energije kada je niskotarifna cijena električne energije 60 €/MWh, a visokotarifna 100 €/MWh**

**Tablica 8. Dnevni gubitak proizvodnje električne energije u zimskom periodu kada noćna i dnevna tarifa prodaje električne energije iznosi 40 €/MWh**

Vrijeme	Protok goriva, B	Snaga plinske turbine	Snaga parne turbine	Ukupna snaga bloka C	Zarada od prodaje el. energije	Cijena goriva	Zarada	
h	kg/s	MW	MW	MW	€	€	€	
1	7,86	111,69	63,70	175,39	7015,60	14399,01	-7383,41	40 €/MWh
2	7,87	111,80	63,80	175,60	7024,00	14417,33	-7393,33	
3	7,87	111,82	63,83	175,65	7025,84	14417,33	-7391,49	
4	7,88	111,86	63,85	175,71	7028,24	14435,65	-7407,41	
5	7,88	111,88	63,87	175,75	7030,00	14439,32	-7409,32	
6	7,86	111,62	63,63	175,25	7010,00	14399,01	-7389,01	
7	10,12	158,39	80,20	238,59	9543,48	18544,68	-9001,20	40 €/MWh
8	10,11	158,00	79,94	237,94	9517,60	18515,37	-8997,77	
9	10,09	157,69	79,75	237,44	9497,60	18484,23	-8986,63	
10	10,08	157,38	79,55	236,93	9477,20	18465,91	-8988,71	
11	10,07	157,10	79,37	236,47	9458,80	18447,59	-8988,79	
12	10,03	156,33	79,27	235,60	9424,00	18374,31	-8950,31	
13	9,99	155,68	79,18	234,86	9394,40	18301,04	-8906,64	
14	9,97	155,27	79,13	234,40	9376,00	18264,40	-8888,40	
15	9,96	155,02	79,09	234,11	9364,40	18253,41	-8889,01	
16	9,96	154,97	79,08	234,05	9362,00	18247,91	-8885,91	
17	9,96	155,03	79,10	234,12	9364,96	18253,96	-8889,00	
18	10,07	157,10	79,37	236,47	9458,80	18447,59	-8988,79	
19	10,08	157,38	79,55	236,93	9477,20	18465,91	-8988,71	
20	10,09	157,69	79,75	237,44	9497,60	18484,23	-8986,63	
21	10,11	158,00	79,94	237,94	9517,60	18515,37	-8997,77	
22	7,83	111,28	63,31	174,59	6983,60	14344,06	-7360,46	40 €/MWh
23	7,85	111,48	63,49	174,97	6998,80	14380,69	-7381,89	
24	7,86	111,62	63,63	175,25	7010,00	14399,01	-7389,01	
UKUPNO:					204857,7	405697,3	-200839,6	

U tablici 8 vidljivi su rezultati matematičkog modela. Tijekom noćnog rada, kako elektrana radi sa smanjenim opterećenjem prikazana je i manja proizvodnja električne energije. U dnevnom periodu zbog veće potrošnje goriva generira se i veći gubitak za ovaj slučaj.

**Tablica 9. Dnevni gubitak proizvodnje električne energije u zimskom periodu kod noćne tarife od 50 €/MWh i dnevne tarife od 75 €/MWh**

Vrijeme	Protok goriva, B	Snaga plinske turbine	Snaga parne turbine	Ukupna snaga bloka C	Zarada od prodaje el. energije	Cijena goriva	Zarada	
h	kg/s	MW	MW	MW	€	€	€	
1	7,86	111,69	63,70	175,39	8769,50	14399,01	-5629,51	50€/MWh
2	7,87	111,80	63,80	175,60	8780,00	14417,33	-5637,33	
3	7,87	111,82	63,83	175,65	8782,30	14417,33	-5635,03	
4	7,88	111,86	63,85	175,71	8785,30	14435,65	-5650,35	
5	7,88	111,88	63,87	175,75	8787,50	14439,32	-5651,82	
6	7,86	111,62	63,63	175,25	8762,50	14399,01	-5636,51	
7	10,12	158,39	80,20	238,59	17894,03	18544,68	-650,66	75 €/MWh
8	10,11	158,00	79,94	237,94	17845,50	18515,37	-669,87	
9	10,09	157,69	79,75	237,44	17808,00	18484,23	-676,23	
10	10,08	157,38	79,55	236,93	17769,75	18465,91	-696,16	
11	10,07	157,10	79,37	236,47	17735,25	18447,59	-712,34	
12	10,03	156,33	79,27	235,60	17670,00	18374,31	-704,31	
13	9,99	155,68	79,18	234,86	17614,50	18301,04	-686,54	
14	9,97	155,27	79,13	234,40	17580,00	18264,40	-684,40	
15	9,96	155,02	79,09	234,11	17558,25	18253,41	-695,16	
16	9,96	154,97	79,08	234,05	17553,75	18247,91	-694,16	
17	9,96	155,03	79,10	234,12	17559,30	18253,96	-694,66	
18	10,07	157,10	79,37	236,47	17735,25	18447,59	-712,34	
19	10,08	157,38	79,55	236,93	17769,75	18465,91	-696,16	50 €/MWh
20	10,09	157,69	79,75	237,44	17808,00	18484,23	-676,23	
21	10,11	158,00	79,94	237,94	17845,50	18515,37	-669,87	
22	7,83	111,28	63,31	174,59	8729,50	14344,06	-5614,56	
23	7,85	111,48	63,49	174,97	8748,50	14380,69	-5632,19	
24	7,86	111,62	63,63	175,25	8762,50	14399,01	-5636,51	
UKUPNO:					344654,4	405697,3	-61042,9	

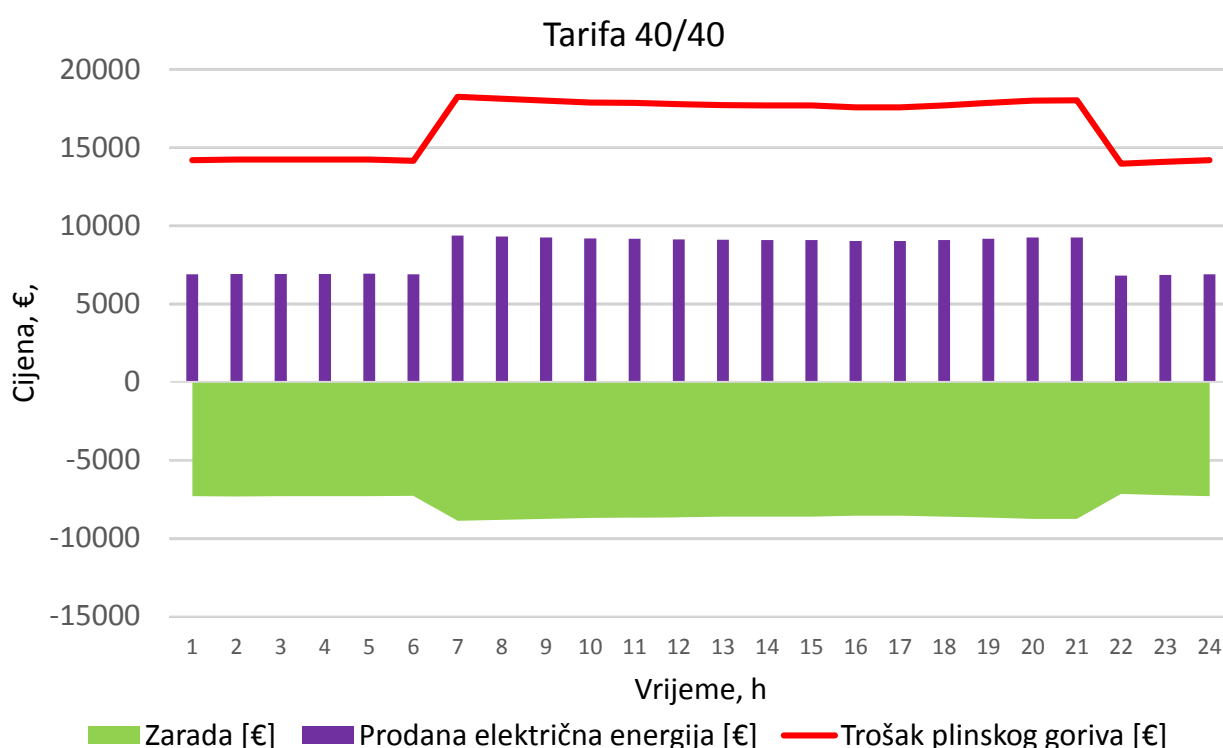


**Tablica 10. Dnevni dobitak proizvodnje električne energije u zimskom periodu kod noćne tarife od 60 €/MWh i dnevne tarife od 100 €/MWh**

Vrijeme	Protok goriva, B	Snaga plinske turbine	Snaga parne turbine	Ukupna snaga bloka C	Zarada od prodaje el. energije	Cijena goriva	Zarada	
h	kg/s	MW	MW	MW	€	€	€	
1	7,86	111,69	63,70	175,39	10523,40	14399,01	-3875,61	60€/MWh
2	7,87	111,80	63,80	175,60	10536,00	14417,33	-3881,33	
3	7,87	111,82	63,83	175,65	10538,76	14417,33	-3878,57	
4	7,88	111,86	63,85	175,71	10542,36	14435,65	-3893,29	
5	7,88	111,88	63,87	175,75	10545,00	14439,32	-3894,32	
6	7,86	111,62	63,63	175,25	10515,00	14399,01	-3884,01	
7	10,12	158,39	80,20	238,59	23858,70	18544,68	5314,02	100 €/MWh
8	10,11	158,00	79,94	237,94	23794,00	18515,37	5278,63	
9	10,09	157,69	79,75	237,44	23744,00	18484,23	5259,77	
10	10,08	157,38	79,55	236,93	23693,00	18465,91	5227,09	
11	10,07	157,10	79,37	236,47	23647,00	18447,59	5199,41	
12	10,03	156,33	79,27	235,60	23560,00	18374,31	5185,69	
13	9,99	155,68	79,18	234,86	23486,00	18301,04	5184,96	
14	9,97	155,27	79,13	234,40	23440,00	18264,40	5175,60	
15	9,96	155,02	79,09	234,11	23411,00	18253,41	5157,59	
16	9,96	154,97	79,08	234,05	23405,00	18247,91	5157,09	
17	9,96	155,03	79,10	234,12	23412,40	18253,96	5158,44	
18	10,07	157,10	79,37	236,47	23647,00	18447,59	5199,41	
19	10,08	157,38	79,55	236,93	23693,00	18465,91	5227,09	
20	10,09	157,69	79,75	237,44	23744,00	18484,23	5259,77	
21	10,11	158,00	79,94	237,94	23794,00	18515,37	5278,63	
22	7,83	111,28	63,31	174,59	10475,40	14344,06	-3868,66	60 €/MWh
23	7,85	111,48	63,49	174,97	10498,20	14380,69	-3882,49	
24	7,86	111,62	63,63	175,25	10515,00	14399,01	-3884,01	
UKUPNO:					449018,2	405697,3	43320,9	

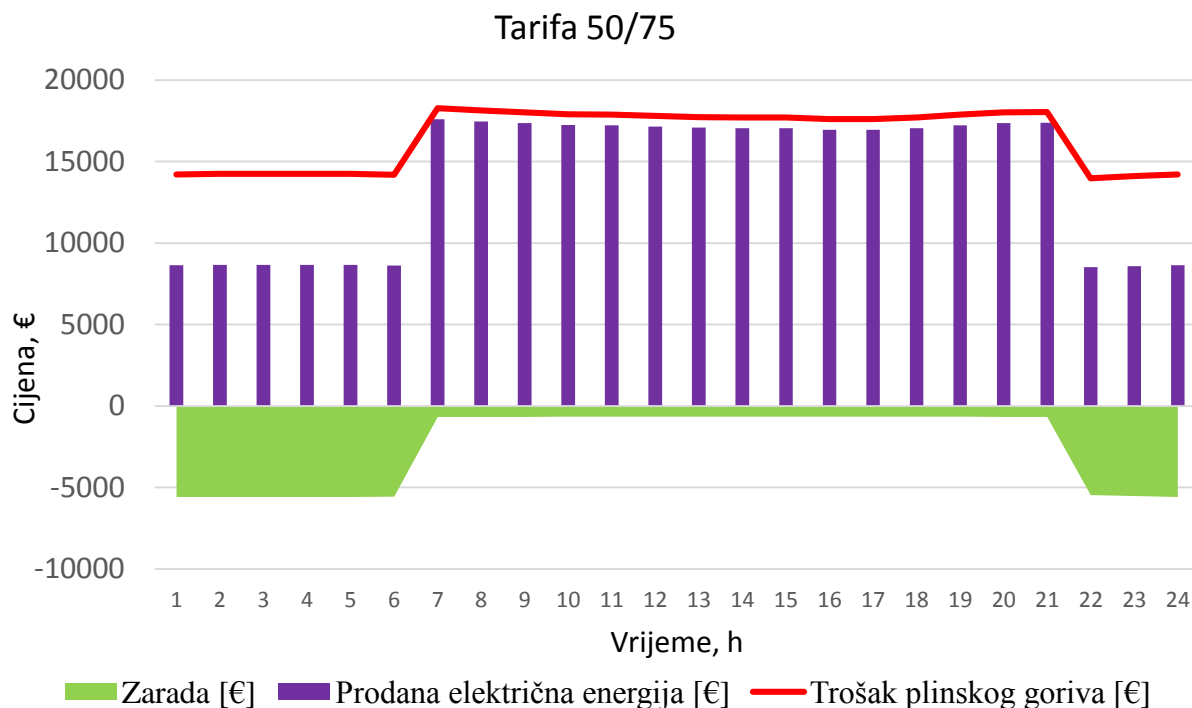
### 5.3. Prijelazno razdoblje

Nakon ljetnog i zimskog karakterističnog dana pokazan je i jedan dan u prijelaznom razdoblju. Matematički model koristi promjenu dnevne temperature kao i promjenu opterećenja bloka te daje vrijednosti snaga plinske i parne turbine. Iz slike 40 možemo vidjeti kako elektrana ako radi pri niskotarifnom sustavu tijekom cijelog dana ostvaruje gubitak u proizvodnji. Kako za prvi slučaj nema zarade blok C posluje s gubitkom. Vrijednosti proračuna vezane za prvi slučaj vidljive su u tablici 11.

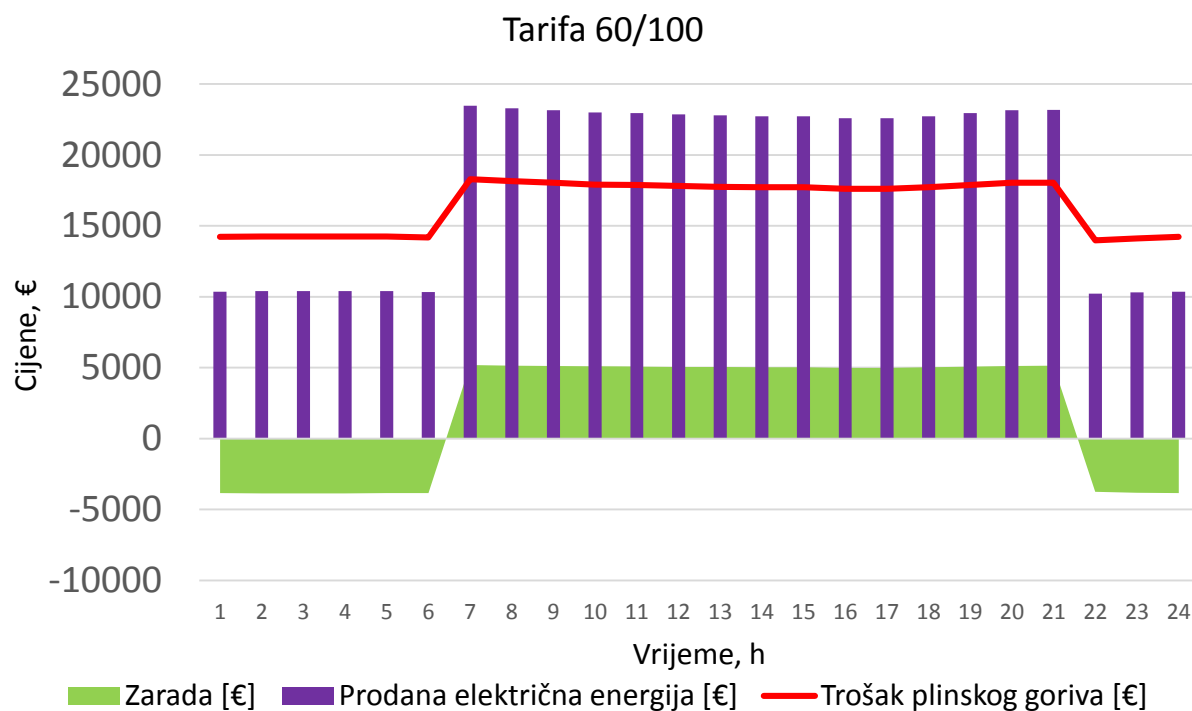


**Slika 40. Prikaz gubitaka u prijelaznom periodu kod proizvodnje električne energije kada dnevna i noćna tarifa iznose 40 €/MWh**

Ostala dva primjera proizvodnje po 75 tj. 100 €/MWh za dnevnu tarifu i 50 odnosno 60 €/MWh pokazana su na slici 41 i 42. Vidljivo je da kao i u slučaju proizvodnje u ljetnim i zimskim danima blok posluje sa zaradom tek za treći slučaj proizvodnje po 60/100 €/MWh. U nastavku su ponovno dani tablični rezultati proračuna. Može se primijetiti je da postoje razlike u dobitcima kada uspoređujemo sa zimskim odnosno ljetnim danom.



**Slika 41. Prikaz gubitaka u prijelaznom periodu kod proizvodnje električne energije kada je niskotarifna cijena električne energije 50 €/MWh, a visokotarifna 75 €/MWh**



**Slika 42. Prikaz dobiti u prijelaznom periodu kod proizvodnje električne energije kada je niskotarifna cijena električne energije 60 €/MWh, a visokotarifna 100 €/MWh**

**Tablica 11. Dnevni gubitak proizvodnje električne energije u prijelaznom periodu kada noćna i dnevna tarifa prodaje električne energije iznosi 40 €/MWh**

Vrijeme	Protok goriva, B	Snaga plinske turbine	Snaga parne turbine	Ukupna snaga bloka C	Zarada od prodaje el. energije	Cijena goriva	Zarada	
h	kg/s	MW	MW	MW	€	€	€	
1	7,76	110,19	62,51	172,70	6908,00	14215,82	-7307,82	40 €/MWh
2	7,78	110,53	62,60	173,13	6925,20	14252,46	-7327,26	
3	7,78	110,56	62,62	173,18	6927,20	14252,46	-7325,26	
4	7,78	110,56	62,62	173,18	6927,20	14252,46	-7325,26	
5	7,78	110,61	62,68	173,29	6931,60	14252,46	-7320,86	
6	7,74	109,87	62,45	172,32	6892,80	14179,18	-7286,38	
7	9,98	155,49	79,15	234,64	9385,60	18282,72	-8897,12	40 €/MWh
8	9,91	153,89	78,94	232,83	9313,20	18147,15	-8833,95	
9	9,84	152,62	78,76	231,38	9255,20	18026,25	-8771,05	
10	9,77	151,33	78,55	229,88	9195,20	17898,01	-8702,81	
11	9,76	151,05	78,50	229,55	9182,00	17879,69	-8697,69	
12	9,72	150,23	78,35	228,58	9143,20	17806,41	-8663,21	
13	9,68	149,56	78,23	227,79	9111,60	17733,14	-8621,54	
14	9,67	149,16	78,15	227,31	9092,40	17711,15	-8618,75	
15	9,67	149,16	78,15	227,31	9092,40	17711,15	-8618,75	
16	9,61	147,96	77,95	225,91	9036,40	17603,07	-8566,67	
17	9,61	147,96	77,95	225,91	9036,40	17603,07	-8566,67	
18	9,67	149,16	78,15	227,31	9092,40	17711,15	-8618,75	
19	9,76	151,05	78,50	229,55	9182,00	17879,69	-8697,69	
20	9,84	152,62	78,76	231,38	9255,20	18026,25	-8771,05	
21	9,85	152,91	78,80	231,71	9268,40	18044,57	-8776,17	
22	7,63	108,21	62,13	170,34	6813,56	13977,67	-7164,11	40 €/MWh
23	7,70	109,27	62,33	171,60	6864,00	14109,57	-7245,57	
24	7,76	110,19	62,51	172,70	6908,00	14215,82	-7307,82	
UKUPNO:					199739,2	395771,4	-196032,2	

**Tablica 12. Dnevni gubitak proizvodnje električne energije u prijelaznom periodu kod noćne tarife od 50 €/MWh i dnevne tarife od 75 €/MWh**

Vrijeme	Protok goriva, B	Snaga plinske turbine	Snaga parne turbine	Ukupna snaga bloka C	Zarada od prodaje el. energije	Cijena goriva	Zarada	
h	kg/s	MW	MW	MW	€	€	€	
1	7,76	110,19	62,51	172,70	8635,00	14215,82	-5580,82	50€/MWh
2	7,78	110,53	62,60	173,13	8656,50	14252,46	-5595,96	
3	7,78	110,56	62,62	173,18	8659,00	14252,46	-5593,46	
4	7,78	110,56	62,62	173,18	8659,00	14252,46	-5593,46	
5	7,78	110,61	62,68	173,29	8664,50	14252,46	-5587,96	
6	7,74	109,87	62,45	172,32	8616,00	14179,18	-5563,18	
7	9,98	155,49	79,15	234,64	17598,00	18282,72	-684,72	75 €/MWh
8	9,91	153,89	78,94	232,83	17462,25	18147,15	-684,90	
9	9,84	152,62	78,76	231,38	17353,50	18026,25	-672,75	
10	9,77	151,33	78,55	229,88	17241,00	17898,01	-657,01	
11	9,76	151,05	78,50	229,55	17216,25	17879,69	-663,44	
12	9,72	150,23	78,35	228,58	17143,50	17806,41	-662,91	
13	9,68	149,56	78,23	227,79	17084,25	17733,14	-648,89	
14	9,67	149,16	78,15	227,31	17048,25	17711,15	-662,90	
15	9,67	149,16	78,15	227,31	17048,25	17711,15	-662,90	
16	9,61	147,96	77,95	225,91	16943,25	17603,07	-659,82	
17	9,61	147,96	77,95	225,91	16943,25	17603,07	-659,82	
18	9,67	149,16	78,15	227,31	17048,25	17711,15	-662,90	
19	9,76	151,05	78,50	229,55	17216,25	17879,69	-663,44	
20	9,84	152,62	78,76	231,38	17353,50	18026,25	-672,75	
21	9,85	152,91	78,80	231,71	17378,25	18044,57	-666,32	
22	7,63	108,21	62,13	170,34	8516,95	13977,67	-5460,72	50 €/MWh
23	7,70	109,27	62,33	171,60	8580,00	14109,57	-5529,57	
24	7,76	110,19	62,51	172,70	8635,00	14215,82	-5580,82	
UKUPNO:					335700,0	395771,4	-60071,4	

**Tablica 13. Dnevni dobitak proizvodnje električne energije u prijelaznom periodu kod noćne tarife od 60 €/MWh i dnevne tarife od 100 €/MWh**

Vrijeme	Protok goriva, B	Snaga plinske turbine	Snaga parne turbine	Ukupna snaga bloka C	Zarada od prodaje el. energije	Cijena goriva	Zarada	
h	kg/s	MW	MW	MW	€	€	€	
1	7,76	110,19	62,51	172,70	10362,00	14215,82	-3853,82	60€/MWh
2	7,78	110,53	62,60	173,13	10387,80	14252,46	-3864,66	
3	7,78	110,56	62,62	173,18	10390,80	14252,46	-3861,66	
4	7,78	110,56	62,62	173,18	10390,80	14252,46	-3861,66	
5	7,78	110,61	62,68	173,29	10397,40	14252,46	-3855,06	
6	7,74	109,87	62,45	172,32	10339,20	14179,18	-3839,98	
7	9,98	155,49	79,15	234,64	23464,00	18282,72	5181,28	100 €/MWh
8	9,91	153,89	78,94	232,83	23283,00	18147,15	5135,85	
9	9,84	152,62	78,76	231,38	23138,00	18026,25	5111,75	
10	9,77	151,33	78,55	229,88	22988,00	17898,01	5089,99	
11	9,76	151,05	78,50	229,55	22955,00	17879,69	5075,31	
12	9,72	150,23	78,35	228,58	22858,00	17806,41	5051,59	
13	9,68	149,56	78,23	227,79	22779,00	17733,14	5045,86	
14	9,67	149,16	78,15	227,31	22731,00	17711,15	5019,85	
15	9,67	149,16	78,15	227,31	22731,00	17711,15	5019,85	
16	9,61	147,96	77,95	225,91	22591,00	17603,07	4987,93	
17	9,61	147,96	77,95	225,91	22591,00	17603,07	4987,93	
18	9,67	149,16	78,15	227,31	22731,00	17711,15	5019,85	
19	9,76	151,05	78,50	229,55	22955,00	17879,69	5075,31	
20	9,84	152,62	78,76	231,38	23138,00	18026,25	5111,75	
21	9,85	152,91	78,80	231,71	23171,00	18044,57	5126,43	
22	7,63	108,21	62,13	170,34	10220,34	13977,67	-3757,33	60 €/MWh
23	7,70	109,27	62,33	171,60	10296,00	14109,57	-3813,57	
24	7,76	110,19	62,51	172,70	10362,00	14215,82	-3853,82	
UKUPNO:					437250,3	395771,4	41479,0	

## 6. ZAKLJUČAK

Matematički model bloka C iz termoelektrane TE Sisak napisan je u programskom paketu MATLAB. Tijekom izrade ovog rada korišteni su podaci dobiveni u TE Sisak. Blok C, TE Sisak radi pri opterećenju od 70-100%. Kako neki ulazni podaci za blok C nisu bili poznati, uzete su vrijednosti iz sličnog bloka TE-TO Zagreb. U svrhu olakšavanja matematičkog modela, zbog svoje kompleksnosti i složenosti, korištene su neke pretpostavke. Matematički model bio bi još točniji ako neke pretpostavke ne bi bile konstantnog iznosa nego promjenjivog iznosa u ovisnosti o opterećenju bloka. Važno je napomenuti kako su dobiveni rezultati približno točni i u usporedbi sa stvarnim vrijednostima nemaju velika odstupanja.

Kako stupanj iskoristivosti procesa u plinskoj turbini raste sa snižavanjem okolišne temperature pokazano je kako u dnevnom razdoblju karakterističnog zimskog dana elektrana ostvaruje najveći profit. Isto tako valja napomenuti kako u noćnom radu ili za vrijeme jeftine tarife, blok C radi s gubitkom upravo iz razloga jer je noćna tarifa po kojoj se prodaje električna energija nedovoljna kako bi blok poslovao s dobitkom. Međutim, glavni utjecaj na profit ima prodajna cijana struje. Vanjska temperatura ima puno manji utjecaj na zaradu bloka. Granična visokotarifna vrijednost iznad koje bi blok radio s dobitkom je oko 78 €/MWh, dok je za niskotarifnu cijenu prodaje električne energije u većini slučajeva potrebno postići cijenu od 80 €/MWh. Ovime je pokazano kako je neisplativo da blok radi samo u svrhu proizvodnje električne energije. U svrhu smanjenja gubitaka, uz električnu, preporučljivo je da blok proizvodi tj. prodaje i toplinsku energiju.

## LITERATURA

- [1] Tehničko-tehnološko rješenje usklađenja postojećeg postrojenja TE Sisak, HEP-Proizvodnja d.o.o.; Zagreb, svibanj 2013
- [2] Bogdan, Ž.: Termoenergetska postrojenja, Zagreb, 2012.
- [3] <http://www.hep.hr/proizvodnja/osnovni/termoelektrane/sisak.aspx>
- [4] <http://cei.hr/projekti/projekti-realizaciji/te-sisak-izgradnja-13/>
- [5] Tehničko-tehnološko rješenje postrojenja Kombi kogeneracijske elektrane Sisak 230 MW<sub>e</sub>/50 MW<sub>t</sub> – TE Sisak blok C; HEP-Proizvodnja d.o.o.; Zagreb, svibanj 2013
- [6] Galović A.: Termodinamika I, Zagreb, 2008.
- [7] Galović A.: Termodinamika II, Zagreb, 2010.
- [8] [http://powerlab.fsb.hr/enerpedia/index.php?title=ENERGETSKE\\_TRANSFORMACIJE](http://powerlab.fsb.hr/enerpedia/index.php?title=ENERGETSKE_TRANSFORMACIJE)
- [9] Mislav Čehil; Doktorski rad ; OPTIMALNO KORIŠTENJE OTPADNE TOPLINE U PARNOTURBINSKOM CIKLUSU DOKTORSKI RAD ; Zagreb, 2010.
- [10] <http://www.tekla.com/in/bim-awards-2013/bestindustrialsteel-%208INSTEEL.html>
- [11] <http://mathworks.com/help/matlab/>



## **PRILOZI**

*CD-R disc*